



Estudo paramétrico de juntas adesivas curvadas em material compósito

JOÃO MANUEL CARVALHO CORREIA

Setembro de 2018

ESTUDO PARAMÉTRICO DE JUNTAS ADESIVAS CURVADAS EM MATERIAL COMPÓSITO

João Manuel Carvalho Correia

1130623

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO PARAMÉTRICO DE JUNTAS ADESIVAS CURVADAS EM MATERIAL COMPÓSITO

João Manuel Carvalho Correia

1130623

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador o Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo apoio e disponibilidade que foi prestada ao longo de toda a realização da dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela oportunidade de frequentar tanto a Licenciatura, como o Mestrado em Engenharia Mecânica, cujos conhecimentos estão aplicados na dissertação

Finalmente aos meus amigos e família por todo o apoio prestado durante a realização deste trabalho.

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas; Juntas curvadas; Material compósito reforçado a fibras de carbono; Adesivos estruturais; Método de Elementos Finitos; Modelos de Dano Coesivo.

RESUMO

Nos dias de hoje, o método de união com recurso a adesivos tem uma presença muito forte nas mais variadas indústrias, sobretudo na aeronáutica, indústria que impulsionou muito fortemente a utilização de juntas adesivas. Este método de união tem muitas vantagens relativamente a métodos mais tradicionais como a soldadura ou a ligação mecânica, entre as quais se destaca a facilidade da aplicação do adesivo, que permite a redução do tempo de fabrico e do custo, assim como uma redução de peso associado à estrutura final, ou o facto de este ser um método muito versátil, que permite a ligação entre diferentes materiais, o que muitas vezes não é possível com os outros métodos de ligação. O mercado de adesivos tem soluções para todos os tipos de ligação, nos quais se podem usar adesivos resistentes e frágeis, como é o caso do Araldite® AV138, ou adesivos menos resistentes, mas dúcteis, como o Araldite® 2015. Têm aparecido também adesivos de poliuretano como o Sikaforce® 7888, que combinam elevada resistência e ductilidade.

Esta dissertação compara o desempenho dos três adesivos supracitados em juntas curvadas com substratos de um compósito de matriz epóxida reforçada a fibra de carbono, considerando a modificação dos parâmetros geométricos de comprimento de sobreposição (L_o), espessura dos aderentes (t_p) e raio de curvatura dos aderentes (R). Para a previsão da resistência destas juntas foi utilizado o Método de Elementos Finitos (MEF) com o Modelo de Dano Coesivo (MDC), cuja análise recaiu sobre as tensões internas do adesivo, dano correspondente, resistência do adesivo e energia dissipada na rotura.

O estudo numérico demonstrou grande influência do parâmetro geométrico t_p no comportamento das ligações adesivas, sobretudo na resistência das juntas, onde se verificou que um aumento deste parâmetro provoca uma drástica queda de desempenho da ligação. Verificou-se também que maiores comprimentos de sobreposição causam um aumento global de todas as variáveis de estudo, demonstrando, no entanto, um comportamento logarítmico para todos os casos, o que indica que quanto mais se aumenta o L_o , o ganho de desempenho da junta é cada vez menor. Relativamente ao tipo de adesivo, as juntas unidas com o Sikaforce® 7888 demonstraram ter o melhor desempenho, seguidas de perto pelo adesivo Araldite® 2015. O adesivo AV138 demonstrou ter um desempenho relativamente inferior aos outros dois, com comportamentos muito constantes, independentemente da variação dos parâmetros de controlo.

KEYWORDS

Adhesive joints; Curved joints; Composite material reinforced with carbon fibers; Structural adhesives; Finite Element Method; Cohesive Zone Models.

ABSTRACT

Nowadays, the adhesive bonding method has a very strong presence in the most varied industries, especially in aeronautics, an industry that has strongly boosted the use of adhesive joints. This bonding method has many advantages over more traditional methods such as welding or mechanical bonding, among which the ease of application of the adhesive, which allows the reduction of the manufacturing time and cost, the reduction of weight associated with the final structure, or the fact that this is a very versatile method, which allows joining between different materials, which is often not possible with the other joining methods. The adhesives market has solutions for all types of bonding, in which strong and brittle adhesives can be used, such as the Araldite® AV138, or less strong but ductile adhesives such as the Araldite® 2015. Polyurethane adhesives have also appeared, such as the Sikaforce® 7888, which combine high strength and ductility.

This dissertation compares the performance of the three above-mentioned adhesives in curved joints with adherends of a carbon fiber reinforced epoxy matrix composite, considering the modification of the following geometric parameters: overlap length (L_o), adherend thickness (t_p) and adherends' radius of curvature (R). For the prediction of the strength of these joints, the Finite Element Method (MEF) was used with Cohesive Zone Model (CZM), whose analysis was based on the internal stresses of the adhesive, corresponding damage, adhesive strength and energy dissipated at failure.

The numerical study showed a great influence of the geometric parameter t_p in the behavior of the adhesive joints, especially in the joint strength, where it was verified that an increase of this parameter causes a drastic decrease in the bond performance. It was also verified that larger overlap lengths cause an overall increase of all the study variables, nevertheless demonstrating a logarithmic behavior for all cases, which indicates that the more the L_o increases, the joint performance gain gets smaller. Regarding the type of adhesive, the joints bonded with the Sikaforce® 7888 showed the best performance, closely followed by the Araldite® 2015. The AV138 adhesive demonstrated to perform relatively inferior to the other two, with very constant behaviors, regardless of the variation of the control parameters.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

| | |
|---------|--|
| APDL | ANSYS 14.5 <i>Parametric Design Language</i> |
| CZM | <i>Cohesive Zone Model</i> |
| DCB | <i>Double-Cantilever Beam</i> |
| ENF | <i>End Notched Flexure</i> |
| HRR | Hutchinson-Rice-Rosengreen |
| LIJ | <i>Joggle Lap Joint</i> |
| JSD | Juntas de Sobreposição Dupla |
| JSS | Juntas de Sobreposição Simples |
| MDC | Modelos de Dano Coesivo |
| MEF | Método de Elementos Finitos |
| MEFX | Método de Elementos Finitos Extendido |
| MIG-MAG | <i>Metal Inert Gas – Metal Active Gas</i> |
| PFR | Plástico reforçado a fibra |
| PRFC | Plástico reforçado com fibra de carbono |
| PRFV | Plástico reforçado com fibra de vidro |
| SDEG | <i>Stiffness Degradation</i> |
| SLJ | <i>Single Lap Joint</i> |
| TAST | <i>Thick Adherent Shear Test</i> |
| TFFV | Técnica do fecho de venda virtual |

| | |
|------------|---------------------------|
| TIG | <i>Tungsten Inert Gas</i> |
|------------|---------------------------|

Lista de Unidades

| | |
|--------|----------------------|
| ° | Grau |
| °C | Grau Celsius |
| g | Gramas |
| GPa | Giga-Pascal |
| J | Joule |
| kJ | Quilo-Joule |
| kN | Quilo-Newton |
| mm | Milímetro |
| mm/min | Milímetro por Minuto |
| MPa | Mega-Pascal |
| N | Newton |
| N/mm | Newton por Milímetro |

Lista de Símbolos

| | |
|-------|--|
| a | Tipo de junta |
| A | Área de contacto |
| b_a | Largura da camada adesiva |
| E | Módulo de Young |
| E_1 | Módulo de elasticidade na direção longitudinal |
| E_2 | Módulo de elasticidade na direção transversal |

| | |
|-----------|---|
| E_3 | Módulo de elasticidade fora do plano |
| G | Módulo de elasticidade transversal |
| G_{12} | Módulo de elasticidade transversal no plano 12 |
| G_{13} | Módulo de elasticidade transversal no plano 13 |
| G_{23} | Módulo de elasticidade transversal no plano 23 |
| G_C | Resistência à fratura |
| G_I | Taxa de liberação de energia pelo modo 1 de fratura |
| G_{IC} | Tenacidade à tração |
| G_{II} | Taxa de liberação de energia pelo modo 2 de fratura |
| G_{IIC} | Tenacidade ao corte |
| G_{III} | Taxa de liberação de energia pelo modo 3 de fratura |
| K | Excentricidade |
| K_{COH} | Matriz que relaciona tensões e deformações |
| K_{nn} | Parâmetro de rigidez |
| K_{ss} | Parâmetro de rigidez |
| L^* | Comprimento da zona coesiva |
| L_{eff} | Comprimento efetivo de transferência de tensão |
| L_o | Comprimento de sobreposição |
| L_t | Comprimento total dos provetes |
| N | Direção normal |
| P | Carga aplicada |
| $P_{máx}$ | Força máxima/ Carga máxima |
| R | Raio de curvatura |

| | |
|---------------|--|
| T | Direção transversal |
| T | Temperatura |
| t_a | Espessura do adesivo |
| t_m^0 | Resistência coesiva em modo misto |
| t_n | Tensão coesiva à tração |
| t_n^0 | Resistência coesiva à tração |
| t_p | Espessura do substrato |
| t_s | Tensão coesiva ao corte |
| t_s^0 | Resistência coesiva ao corte |
| x/L_0 | Comprimento de sobreposição normalizado |
| α_{II} | Rigidez do ramo elástico |
| λ | Parâmetro que representa a influência do módulo de elasticidade e da área de contacto de cada um dos aderentes |
| ν | Coeficiente de Poisson |
| ν_{12} | Coeficiente de Poisson no plano 12 |
| ν_{13} | Coeficiente de Poisson no plano 13 |
| ν_{23} | Coeficiente de Poisson no plano 23 |
| δ | Deslocamento |
| δ_m^0 | Deslocamento de resistência máxima em modo misto |
| δ_m^f | Deslocamento de rotura em modo misto |
| δ_n^0 | Deslocamento de tração |
| δ_n^f | Deslocamento de rotura à tração |
| δ_s^0 | Deslocamento de corte |

| | |
|-----------------|---------------------------------|
| δ_s^f | Deslocamento de rotura ao corte |
| ε | Deformação |
| ε_f | Deformação de rotura à tração |
| γ_f | Deformação de rotura ao corte |
| σ | Tensão |
| σ_f | Tensão de rotura à tração |
| σ_y | Tensão de cedência à tração |
| τ_{avg} | Tensão de corte média |
| τ_f | Tensão de rotura ao corte |
| τ_y | Tensão de cedência ao corte |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Caracterização de tensões existentes numa ligação mecânica [2]..... | 8 |
| Figura 2 - Representação de uma zona termicamente afetada [5] | 9 |
| Figura 3 - Representação de uma junta adesiva (Adaptado de [9]) | 11 |
| Figura 4 - Caça britânico mosquito [12] | 13 |
| Figura 5 - Alguns locais de aplicação de adesivos estruturais na carroçaria de um automóvel [13] | 13 |
| Figura 6- Aplicação de adesivo estrutural na união de tijolos [18] | 14 |
| Figura 7 - Esquema representativo das diversas aplicações de um adesivo num barco em polímero reforçado com fibra de vidro [21]..... | 15 |
| Figura 8 - Datas de aplicação de polímeros orgânicos na indústria eletrónica e suas principais aplicações [22]..... | 16 |
| Figura 9 - Representação de um esforço de tração numa junta [24]..... | 17 |
| Figura 10 - Representação de um esforço de compressão numa junta [2]..... | 17 |
| Figura 11 - Representação de um esforço de corte numa junta [24]..... | 18 |
| Figura 12 - Distribuição de tensões numa junta adesiva submetida a corte [35] | 18 |
| Figura 13 - Variação da resistência ao corte de uma junta em função do seu comprimento e da sua largura [2] | 18 |
| Figura 14 - Representação de um esforço de clivagem numa junta [2] | 19 |
| Figura 15 - Representação de um esforço de arrancamento numa junta [2] | 19 |
| Figura 16 - Distribuição das tensões ao longo de uma junta submetida a esforços de clivagem e arrancamento [2] | 19 |
| Figura 17- Representação do fenómeno de arrancamento e suas tensões numa JSS [36]..... | 20 |
| Figura 18 - Representação dos 4 modos de rotura que podem ocorrer numa junta adesiva [2] | 20 |
| Figura 19 – Esquema de uma JSS [2] | 21 |
| Figura 20- Junta de sobreposição com ressalto [23] | 22 |
| Figura 21 - Junta de sobreposição com chanfro [23] | 22 |
| Figura 22 – Esquema de uma JSD [23]..... | 22 |
| Figura 23 - Variação das tensões de corte numa JSS: (1) JSS convencional; (2) JSS com chanfro e espessura finita de adesivo e (3) JSS com chanfro e sem espessura de adesivo [23]..... | 22 |

| | |
|--|----|
| Figura 24 - Influência do chanfro e correspondente aumento da capacidade de carga da junta [23] | 23 |
| Figura 25 - Configurações possíveis para juntas topo a topo [40] | 23 |
| Figura 26 - Algumas configurações para juntas em tira (Adaptado de [23]) | 24 |
| Figura 27 - Configurações possíveis para juntas tubulares: a) Ligações em varões; b) Ligações em tubos (Adaptado de [23]) | 25 |
| Figura 28 - Configurações possíveis para juntas em T (Adaptado de [31]) | 26 |
| Figura 29 - Configurações possíveis para juntas em canto (Adaptado de [31]) | 27 |
| Figura 30 - Resistência de uma junta adesiva em função do L_o [10] | 28 |
| Figura 31 - Força de rotura de uma ligação adesiva em função do L_o para adesivos frágeis e dúcteis [23] | 28 |
| Figura 32 - Efeito da espessura do substrato de alumínio na resistência de juntas adesivas [44] | 29 |
| Figura 33 - Representação de um filete numa ligação adesiva [10] | 30 |
| Figura 34 - Perfil com chanfro otimizado de acordo com Groth e Nordlund [10] | 30 |
| Figura 35 - Perfil otimizado de acordo com o estudo realizado por Hart-Smith (Adaptado de [56]) | 31 |
| Figura 36 – JSD modificadas com chanfros: (1) JSD normal; (2) JSD com chanfro exterior; (3) JSD com chanfro interior; (4) JSD com filete de adesivo; (5) JSD com chanfro interior no aderente e filete no adesivo. As dimensões representadas estão em mm [46] | 31 |
| Figura 37- Configurações estudadas: (a) JSS convencional e b) junta de ressalto [29] | 32 |
| Figura 38 - Distribuição de tensões axiais ao longo do comprimento de sobreposição para juntas com ressalto (JLJ) e JSS (SLJ) [29] | 33 |
| Figura 39 - Distribuição de tensões de arrancamento ao longo do comprimento de sobreposição para juntas com ressalto (JLJ) e JSS (SLJ) [29] | 33 |
| Figura 40- Distribuição de tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição para juntas com ressalto (JLJ) e JSS (SLJ) [29] | 33 |
| Figura 41 - Tensões na junta de ressalto: a) Tensões uniaxiais; b) Tensões de arrancamento; c) Tensões de corte [29] | 34 |
| Figura 42 – Esquema de uma JSS (a) e de uma junta de ressalto (b). As dimensões estão em mm [57] ... | 35 |
| Figura 43 - a) Curvas de força-deslocamento de JSS (a) e juntas de ressalto (b) [53] | 35 |
| Figura 44 - Modelos numéricos utilizados no estudo: (a) JSS convencional e (b) JSS com dobragem dos aderentes na zona de colagem e sem excentricidade [58] | 36 |
| Figura 45 - Distribuição de tensões de corte no adesivo para várias excentricidades. Valores retirados para a espessura média do adesivo [58] | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 46 - Modelo de uma junta com rasgo transversal utilizado no estudo de elementos finitos realizado por Yan et al. [59] | 37 |
| Figura 47 - Ligação adesiva curvada [60] | 38 |
| Figura 48 - Junta adesiva curvada estudada no trabalho de Ascione et al. [61] | 39 |
| Figura 49 – Diferentes grupos de reforços estudados e respetivos valores de módulo de Young (E) e módulo de elasticidade ao corte (G): no grupo A, a estrutura é de betão armado e o reforço é de PRFC; no grupo B, a estrutura é de alvenaria e o reforço é de PRFC; no grupo C, a estrutura é de betão armado e o reforço é de PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro) e, no grupo D, a estrutura é de alvenaria e o reforço é de PRFV [61] | 39 |
| Figura 50 - Junta de sobreposição simples com delaminação interfacial com comprimento de 10 mm entre a primeira e a segunda camada de " <i>strap adherent</i> ": a) Configuração geométrica da junta de sobreposição simples e respetiva carga; b) Vista aumentada que pretende dar realce à delaminação; c) Vista em corte de 2 dimensões que demonstra a delaminação entre os pontos A e B [62] | 40 |
| Figura 51 - Representação da região de sobreposição e respetiva densidade de malha [62] | 41 |
| Figura 52 - Vista em corte das juntas curvadas testadas [62] | 41 |
| Figura 53 - Configurações estudadas: no centro, tem-se uma junta curvada com ressalto, com dano inicial e com as extremidades constrangidas; (a) junta curvada; (b) junta curvada com as extremidades constrangidas; c) junta com ressalto; d) duas juntas, uma com largura de 15 mm e outra com largura de 45 mm com diferentes cenários de dano inicial [60] | 42 |
| Figura 54 – Geometria das juntas: (a) geometria de base de uma JSS; (b) modelo de elementos finitos da junta (a); (c) junta curvada realizada a partir da junta (a) [60] | 43 |
| Figura 55 - Elementos coesivos para simular uma camada de adesivo: aproximação local (a) e aproximação contínua (b) (adaptado de [80]) | 46 |
| Figura 56 - Modelo coesivo triangular [92, 94] | 48 |
| Figura 57 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [110] | 50 |
| Figura 58 - Geometria da junta curvada criada em Abaqus® para o caso particular em que a espessura dos aderentes é de 1,2 mm e o comprimento de sobreposição é 10 mm | 54 |
| Figura 59 - Definição do tipo de elementos para o substrato e adesivo da junta realizado em Abaqus® | 54 |
| Figura 60 - Representação das condições de carregamento simuladas em Abaqus®, com pormenor na extremidade, onde se coloca a força de tração | 55 |
| Figura 61 - Representação da refinação da malha e sentido do <i>bias</i> necessário para a zona de sobreposição | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 62 - Representação da refinação da malha e sentido do <i>bias</i> necessário para a zona em que os substratos não se encontram em contacto com o adesivo | 56 |
| Figura 63 - Representação da refinação da malha e sentido do <i>bias</i> definido ao longo da espessura dos substratos | 56 |
| Figura 64 - Malha formada para representar a camada de adesivo | 56 |
| Figura 65 - Definição do tipo de malha e forma dos elementos da malha para a camada de adesivo | 57 |
| Figura 66 – Definição do tipo de malha e forma dos elementos da malha para as secções dos substratos | 57 |
| Figura 67 - Tipo de elemento definido para o material constituinte da camada de adesivo | 58 |
| Figura 68 - Tipo de elemento definido para o material constituinte das secções representativas dos substratos | 58 |
| Figura 69 - Esboço das juntas e respetivas dimensões: (a) JSS convencional e (b) junta curvada | 60 |
| Figura 70 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [115] | 61 |
| Figura 71 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [115] | 62 |
| Figura 72 - Curva σ - ε de um provete maciço do adesivo Sikaforce® 7888 [111] | 63 |
| Figura 73 - Ciclo térmico para cura das placas de pré-impregnado [111] | 65 |
| Figura 74 - Pormenor do corte da placa de compósito [111] | 65 |
| Figura 75 - Máquina Ensaio Universal SHIMADZU [111] | 66 |
| Figura 76 - Curva P - δ para o adesivo Araldite® AV138 para o L_o de 20 mm [111] | 67 |
| Figura 77 - Curva P - δ para o adesivo Araldite® AV138 para o L_o de 70 mm [111] | 67 |
| Figura 78 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para o adesivo Araldite® 2015 para o L_o de 50 mm [112] | 68 |
| Figura 79 - Curva P - δ para o adesivo Sikaforce® 7888 para o L_o de 20 mm [111] | 69 |
| Figura 80 - Curva P - δ para o adesivo Sikaforce® 7888 para o L_o de 70 mm [111] | 70 |
| Figura 81 - Rotura coesiva nas juntas com 10 mm sobreposição com adesivo AV138 [111] | 71 |
| Figura 82 - Rotura intralaminar nas juntas com 40 mm de sobreposição com o adesivo AV138 [111] | 71 |
| Figura 83 - Representação da rotura coesiva: a) L_o de 20mm b) L_o de 80mm [112] | 72 |
| Figura 84 - Roturas obtidas nas juntas com comprimento de sobreposição de 50 mm [111] | 72 |
| Figura 85 - Rotura no compósito observado em algumas juntas de sobreposição simples com 80 mm de sobreposição [111] | 73 |
| Figura 86 - $P_{m\acute{a}x}$ experimental e numérico para o adesivo Araldite® AV138 | 73 |
| Figura 87 - $P_{m\acute{a}x}$ experimental e numérico para o adesivo Araldite® 2015 | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 88 - $P_{\text{máx}}$ experimental e numérico para o adesivo Sikaforce® 7888 | 74 |
| Figura 89 - Tensão de corte em função do L_o para $t_p = 2,4$ mm, Araldite® 2015 e R de 2000 mm..... | 78 |
| Figura 90 - Tensão de corte em função do L_o para $t_p = 2,4$ mm, Araldite® AV138 e R de 2000 mm | 79 |
| Figura 91 - Tensão de corte em função do L_o para $t_p = 2,4$ mm, Sikaforce® 7888 e R de 2000 mm..... | 80 |
| Figura 92 - Tensão de corte em função do t_p , para L_o de 10 mm e 80 mm, R de 2000 mm, considerando que a junta usa o adesivo Araldite® 2015 | 81 |
| Figura 93 - Tensão de arrancamento em função do L_o , para t_p de 2,4 mm, Araldite® 2015 e R de 2000 mm | 82 |
| Figura 94 - Tensão de arrancamento em função do L_o , para t_p de 2,4 mm, Araldite® AV138 e R de 2000 mm | 83 |
| Figura 95 - Tensão de arrancamento em função do L_o , para t_p de 2,4 mm, Sikaforce® AV138 e R de 2000 mm | 83 |
| Figura 96 - Tensão de arrancamento em função do t_p , para L_o de 10 mm e 80 mm, R de 2000 mm, considerando que a junta usa o adesivo Araldite® 2015 | 84 |
| Figura 97 - Variação da variável SDEG em função do comprimento de sobreposição para t_p de 2,4 mm, Araldite® 2015 e R de 2000 mm | 85 |
| Figura 98 - Variação da variável SDEG para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para R de 2000 mm, t_p de 1,2 mm e L_o de 10 e 80 mm | 86 |
| Figura 99 - Variação da variável SDEG em função de t_p para L_o de 10 mm e 80mm, Araldite® 2015 e R de 2000 mm | 87 |
| Figura 100 - Valor de $P_{\text{máx}}$ em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 1,2 mm | 88 |
| Figura 101 - Valor de $P_{\text{máx}}$ em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 2,4 mm | 89 |
| Figura 102 - Valor de $P_{\text{máx}}$ em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 3,6 mm | 89 |
| Figura 103 – Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 1,2 mm..... | 91 |
| Figura 104 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 2,4 mm..... | 91 |
| Figura 105 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 3,6 mm | 92 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Evolução do campo de ligações adesivas ao longo do século XX [8] | 10 |
| Tabela 2 - Exemplos de adesivos requeridos para cada operação realizada no fabrico de um sapato (adaptado de [13]) | 16 |
| Tabela 3 - Comprimentos máximo e mínimo para os elementos da malha, dependendo da espessura do substrato a ser testada | 56 |
| Tabela 4 - Propriedades dos substratos constituídos por PRFC [113] | 61 |
| Tabela 5 - Propriedades do Araldite® AV138 [116] | 62 |
| Tabela 6 - Propriedades do Araldite® 2015 [115] | 63 |
| Tabela 7 - Propriedades do Sikaforce® 7888 [115] | 64 |
| Tabela 8 - $P_{\text{máx}}$ experimental para JSS com o adesivo Araldite® AV138 [111] | 68 |
| Tabela 9 - $P_{\text{máx}}$ experimental para JSS com o adesivo Araldite® 2015 [112] | 69 |
| Tabela 10 - $P_{\text{máx}}$ experimental para JSS com o adesivo Sikaforce® 7888 [111] | 70 |
| Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A=0,2$ mm. [123] | 76 |
| Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com $t_A=0,2$ mm. [123] | 77 |
| Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7888 com $t_A=0,2$ mm. [123] | 78 |

ÍNDICE

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Contextualização | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 2 |
| 1.3 | Organização da dissertação | 2 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.1 | Ligações adesivas | 7 |
| 2.1.1 | Caracterização das juntas adesivas | 10 |
| 2.1.2 | Aplicações comuns das juntas adesivas | 12 |
| 2.1.3 | Esforços e modos de rotura em juntas adesivas | 17 |
| 2.1.4 | Configurações possíveis de junta | 21 |
| 2.2 | Alterações geométricas em juntas adesivas | 27 |
| 2.2.1 | Comprimento de sobreposição | 27 |
| 2.2.2 | Espessura dos aderentes | 29 |
| 2.2.3 | Utilização de filetes de adesivo | 30 |
| 2.2.4 | Utilização de chanfros | 30 |
| 2.2.5 | Juntas de ressalto | 32 |
| 2.2.6 | Outras alterações geométricas | 34 |
| 2.2.7 | Juntas adesivas com curvatura | 37 |
| 2.2.7.1 | Considerações gerais | 37 |
| 2.2.7.2 | Exemplos de trabalhos realizados | 38 |
| 2.3 | Previsão de resistência de juntas adesivas | 43 |
| 2.3.1 | Mecânica dos meios contínuos | 44 |
| 2.3.2 | Mecânica da fratura | 45 |
| 2.3.3 | Modelos de dano coesivo | 46 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.3.3.1 | Tipos de leis coesivas | 47 |
| 2.3.4 | Mecânica do dano | 48 |
| 2.3.5 | Método de Elementos Finitos Extendido | 49 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO..... | 53 |
| 3.1 | Técnica numérica para previsão da resistência | 53 |
| 3.1.1 | Condições da análise numérica | 53 |
| 3.1.2 | Modelo de dano coesivo | 58 |
| 3.1.3 | Validação da técnica numérica..... | 59 |
| 3.1.3.1 | Geometria da junta | 60 |
| 3.1.3.2 | Materiais utilizados..... | 60 |
| 3.1.3.2.1 | Substratos | 60 |
| 3.1.3.2.2 | Adesivos | 61 |
| 3.1.3.3 | Processo de fabrico..... | 64 |
| 3.1.3.4 | Ensaio das juntas | 65 |
| 3.1.3.5 | Resultados obtidos..... | 66 |
| 3.1.3.5.1 | Curvas P- δ | 66 |
| 3.1.3.5.2 | Modos de rotura | 70 |
| 3.1.3.5.3 | Resistência das juntas e validação da técnica numérica..... | 73 |
| 3.2 | Trabalho numérico..... | 75 |
| 3.2.1 | Leis coesivas para simulação do adesivo..... | 75 |
| 3.2.1.1 | Araldite® AV138..... | 76 |
| 3.2.1.2 | Araldite® 2015 | 76 |
| 3.2.1.3 | Sikaforce 7888 | 77 |
| 3.2.2 | Estudo de parâmetros geométricos | 78 |
| 3.2.2.1 | Estudo das tensões de corte..... | 78 |
| 3.2.2.2 | Estudo das tensões de arrancamento | 81 |
| 3.2.2.3 | Estudo da variável de dano | 85 |
| 3.2.2.4 | Previsão da resistência..... | 88 |
| 3.2.2.5 | Previsão da energia dissipada..... | 90 |

| | | |
|---|------------------|-----|
| 4 | CONCLUSÕES..... | 97 |
| 5 | REFERÊNCIAS..... | 101 |

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

É um facto que, nos últimos anos, tem ocorrido uma crescente utilização de materiais compósitos na indústria aeronáutica, sobretudo de plásticos reforçados com fibra de carbono (PRFC), escolhidos muito por causa da sua alta rigidez e resistência específica. Estes componentes estruturais de material compósito podem ser ligados com recurso a ligações mecânicas, ligações adesivas, ou uma combinação dos dois anteriores. No entanto, o uso de ligações adesivas para este tipo de aplicações tem claras vantagens, relativamente ao uso de ligações mecânicas, nomeadamente a facilidade da aplicação do adesivo, que permite redução de tempos de fabrico e de custo, assim como uma redução de peso associada à estrutura final. No que diz respeito às juntas curvadas em concreto, a utilização destas é muito recente, cujas aplicações se cingem sobretudo na presença em reservatórios curvos ou na criação de componentes com curvatura para a indústria aeronáutica. O estudo destas juntas em particular é quase inexistente, não existindo ainda muitos trabalhos realizados, portanto é do maior interesse um aprofundamento do conhecimento relativo às juntas curvadas.

Devido à crescente utilização das ligações adesivas nas mais variadas indústrias, torna-se importante a existência de ferramentas que permitam a realização de projetos destas ligações ou o seu estudo científico. A metodologia que tem sido usada com cada vez mais recorrência ao longo dos anos é o Método de Elementos Finitos (MEF), que se tem revelado como uma ferramenta bastante versátil e com precisão bastante elevada, e de uso tanto em casos simples como em outros mais complexos. No âmbito das técnicas disponíveis, uma das mais populares é a utilização de Modelos de Dano Coesivo (MDC), por combinarem os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para prever de forma precisa o desempenho das ligações adesivas. Assim, consegue-se realizar modelos para a simulação de diversos tipos de ligações, com diferentes adesivos, substratos e configurações de junta. Como tal, é cada vez mais global a utilização desta técnica numérica que, atualmente, constitui a melhor alternativa para o estudo e previsão da resistência de juntas adesivas.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo a realização de um estudo paramétrico numérico aplicado a juntas com substratos curvados sujeita a esforços de tração. As juntas curvadas são simuladas com três adesivos diferentes, o Araldite® AV138, o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7888, para oito diferentes comprimentos de sobreposição (L_o) a variar entre 10 mm e 80 mm, com intervalos de 10 mm e com espessuras de aderentes (t_p) de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm.

Numa primeira fase pretende-se confirmar a validade do método numérico a ser usado. Para tal, este estudo foi previamente realizado em juntas de sobreposição simples (JSS), sendo depois os resultados numéricos comparados com os resultados experimentais observados em dois trabalhos diferentes. A comparação entre o estudo numérico e os estudos experimentais permitem averiguar se de facto se a abordagem numérica a ser utilizada para o estudo das juntas curvadas produz resultados que possam ser fiáveis.

A última fase da dissertação consiste na realização do estudo numérico e posterior apresentação de resultados. Pretende-se simular os materiais usados para as juntas curvadas no software Abaqus®, assim como as respetivas condições de carga a que as juntas estão submetidas. O estudo realizado tem como objetivo o de averiguar a influência do L_o , t_p e dos adesivos utilizados, ao nível das tensões internas da camada de adesivo, dano observado, resistência da junta e energia dissipada.

1.3 Organização da dissertação

Para uma melhor interpretação do trabalho realizado, esta dissertação foi dividida em 4 capítulos distintos.

No capítulo 1 é feito enquadramento do trabalho a ser realizado, definindo os objetivos e fazendo uma breve caracterização do mesmo.

No capítulo 2 é feito o estado da arte necessário a perceber antes de ser possível realizar o trabalho. Nesta secção faz-se uma introdução à temática das ligações adesivas, onde se referem as características deste tipo de ligação, assim como vantagens, desvantagens, aplicações, modos de rotura, tipos de junta e influência de alguns parâmetros geométricos no comportamento de juntas adesivas. No final deste capítulo é feita ainda um estado de arte relativo às juntas curvadas propriamente ditas. Como o estudo deste tipo de ligações é ainda muito recente, não foi possível encontrar qualquer bibliografia associada, sendo que se apresenta apenas as conclusões de alguns trabalhos recentes realizados no âmbito da área das juntas curvadas.

O capítulo 3 é dividido em 2 partes fundamentais. Na primeira parte é feita a validação do estudo numérico a ser utilizado para a caracterização das juntas curvadas. Para tal, foi feito uma análise de MEF em JSS, sendo que os resultados obtidos foram comparados com resultados de 2 trabalhos experimentais realizados por outros autores, a fim de comprovar a precisão do método numérico. Na segunda parte é realizado o estudo numérico, com a respetiva apresentação e discussão de resultados.

O capítulo 4 consiste na conclusão, onde se apresentam os pontos importantes verificados no estudo numérico feito em juntas curvadas e propostas de à realização de possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como principal finalidade fazer um estado da arte acerca sobre ligações adesivas. Primeiramente será feita uma introdução a conceitos gerais, tais como os diferentes tipos de adesivos, configurações de junta e esforços a que as mesmas estão submetidas.

Grande parte deste capítulo irá recair sobre os efeitos que alterações geométricas podem causar em juntas adesivas, como por exemplo a alteração de L_o , ou t_p .

Pretende-se também dar ênfase às juntas adesivas com curvatura, visto que estas são o objeto de estudo desta dissertação. Uma vez que o estado da arte relativo a este tipo de juntas é ainda muito escasso, aqui irá ser dada alguma ênfase a trabalhos já realizados, como ponto de partida para a realização da tese em causa.

De modo a finalizar o estado da arte, relativo às juntas adesivas, fez-se a referência a alguns métodos numéricos e analíticos, que têm como principal finalidade prever o comportamento das juntas adesivas através de simulações que emulam condições reais a que estas podem estar submetidas.

2.1 Ligações adesivas

Um dado processo de ligação deve ser capaz de garantir a segurança e integridade de uma estrutura através da melhor união possível dos seus vários constituintes. Existem vários tipos de ligação, entre os quais os mais populares na indústria são as ligações mecânicas, as ligações soldadas e as ligações adesivas. Todos estes têm as suas vantagens e inconvenientes, no que diz respeito ao fabrico e qualidade da junta. Esta dissertação irá falar um pouco de cada tipo de ligação, dando ênfase às ligações adesivas, já que estas são o objeto deste estudo.

As ligações mecânicas são aquelas em que as superfícies da junta são unidas com recurso a elementos que permitem uma conexão mecânica, tais como parafusos, pinos, pregos ou rebites.

Este tipo de junta é o mais comum na indústria, dada a facilidade com que se realiza a ligação, uma vez que a mão de obra para a realização deste processo é barata e que a junta propriamente dita é fácil e rápida de ser realizada. No entanto, implicam também a perfuração das superfícies, o que acaba por danificar e afetar o aspeto das mesmas. A grande vantagem deste processo de ligação é o facto de ser possível

desmontar a junta. Isto é muito benéfico para casos em que se pretenda fazer a inspeção ou reparação da junta, visto que o conector mecânico que está a fazer a ligação é facilmente removível [1].

As desvantagens da utilização de ligações mecânicas são sobretudo a nível de desempenho. A principal é o facto de existirem concentrações de tensão nas zonas onde a ligação é realizada (Figura 1), o que afeta imensamente a resistência da união, nomeadamente à fadiga. Por outro lado, as juntas ligadas mecanicamente apresentam uma grande vulnerabilidade a fenómenos de corrosão galvânica, por causa da interação existente entre os elementos mecânicos e as superfícies a unir. É normal o uso de camadas de elementos de sacrifício mais suscetíveis de sofrer corrosão para prevenir este fenómeno, mas a um maior custo de realização do processo de ligação [2].



Figura 1 - Caracterização de tensões existentes numa ligação mecânica [2]

As ligações soldadas são aquelas em que a junta é realizada com recurso à fusão parcial das superfícies a unir. É uma técnica amplamente utilizada na indústria, dada o seu enorme campo de aplicação, uma vez que fornece uma enorme gama de diferentes processos, tais como *Tungsten Inert Gas* (TIG), *Metal Inert Gas – Metal Active Gas* (MIG-MAG), elétrodo revestido, arco elétrico, explosão, pontos, arco submerso e muitos outros para as mais variadas situações [3]. No entanto, a realização de juntas soldadas implica mão de obra bastante especializada, dada a dificuldade da realização das ligações. Também exige uma preparação muito cuidada das superfícies, sendo necessária a utilização de equipamento bastante caro para a criação das juntas. Em termos de desempenho, as juntas soldadas conseguem trabalhar a grandes temperaturas. No entanto, a existência de regiões onde as propriedades das superfícies unidas estão muito afetadas, denominadas de zonas termicamente afetadas, criadas por ação do calor criado à volta do cordão de soldadura, diminui muito a resistência mecânica das juntas soldadas, como demonstrado na Figura 2 [4].

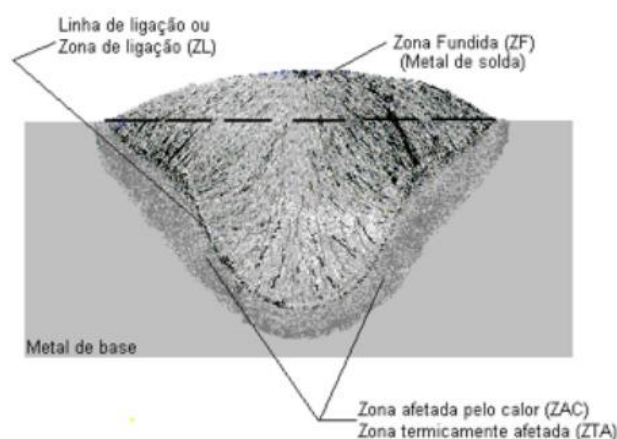


Figura 2 - Representação de uma zona termicamente afetada [5]

As ligações adesivas são aquelas em que a junta é realizada com recurso a uma substância denominada por adesivo, que permite uma colagem tipicamente permanente das superfícies a unir.

É complicado fazer um enquadramento histórico no que diz respeito à origem das ligações adesivas, dado que é impossível datar as primeiras utilizações de técnicas de colagem. Gaius Plinius Secundus, um naturalista grego, afirma que a cola foi inventada por Dédalo na ilha grega de Creta por volta de 1300-1000 A.C. [6].

De acordo com a antiga lenda da mitologia grega, Dédalo criou umas asas artificiais à base de cera de mel de abelhas. Estas iriam depois ser usadas pelo filho Ícaro que, ao chegar demasiado perto do sol, viu as asas dele derreter, acabando por cair fatalmente no mar Egeu. Também foram encontradas nas Montanhas Harz, em Koenigsau (Alemanha), ferramentas neandertais com resíduos de uma substância adesiva obtida a partir da resina de bétula, datando de 80000 anos [7].

No entanto, só a partir do século XX é que as ligações adesivas propriamente ditas têm sido mais utilizadas na indústria. A ocorrência das várias guerras dos últimos 100 anos obrigou a uma contínua evolução da indústria militar, aeronáutica e aeroespacial, o que por sua vez motivou o crescimento de ligações adesivas. Na Tabela 1 apresentam-se, de forma resumida, os principais avanços registados no campo dos adesivos durante o século XX.

Tabela 1 - Evolução do campo de ligações adesivas ao longo do século XX [8]

| | |
|---------------|---|
| Antes de 1910 | Colas provenientes de ossos de animais Colas feitas a partir de peixes Adesivos vegetais |
| 1910 | Adesivos à base de caseína Fenol-Formaldeído |
| 1920 | Ester de celulose Resina alquídica Borracha ciclizada em adesivos Policloropropeno |
| 1930 | Ureia formaldeído Fitas sensíveis à pressão Filmes de adesivo de resina fenólica Colas para madeira em acetato de polivinilo |
| 1940 | Nitrilo-fenólico Borracha clorada Melamina formaldeído Vinilo-fenólico Acrílico Poliuretanos |
| 1950 | Epóxidos Cianoacrilatos Anaeróbicos Ligas de epóxido |
| 1960 | Poliimidas Polibenzimidazole Polyquinoxaline |
| 1970 | Acrílicos de segunda geração Acrílicos sensíveis à pressão Poliuretanos estruturais |
| 1980 | Endurecedores para resinas termoendurecíveis Epóxidos à base de água Adesivos de contacto à base de água Termofusíveis deformáveis e em espuma Resinas poliaromáticas para altas temperaturas |
| 1990 | Epóxido modificado com poliuretano Termofusíveis curáveis Sistemas de cura à base de luz e radiação ultravioleta |
| 2000 | Adesivos à base de água Redução de compostos orgânicos voláteis Adesivos de uma e duas partes sem solvente |

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Como já foi visto, os adesivos já têm sido utilizados desde há muitos séculos, com a sua grande evolução a ocorrer no século XX, com o desenvolvimento de diversas indústrias, nomeadamente a aeronáutica, e com as descobertas realizadas em polímeros sintéticos, que constituem a base dos adesivos estruturais utilizados em aplicações de maior responsabilidade. Estes polímeros sintéticos possuem

propriedades que permitem que estes tenham uma melhor aderência com outros materiais [9]. Um adesivo é então um material de natureza polimérica capaz de formar uma ligação entre 2 superfícies distintas, tendo este de ter a capacidade de resistir à combinação de forças de coesão (forças resultantes da atração entre átomos e ou moléculas da mesma substância) e forças de adesão (forças resultantes da atração entre moléculas ou átomos de diferentes substâncias, ou seja, adesivo/superfície). Um adesivo é estrutural quando este possui uma resistência ao corte superior a 7 MPa, sendo responsável em grande parte pela rigidez e resistência da estrutura.

A Figura 3 mostra os diferentes constituintes de uma junta adesiva [10]. Os dois materiais a serem unidos são denominados por substratos. Após a realização da ligação, estes passam a ser definidos como aderentes. Após a realização da junta, é formada uma região chamada de interfase. Esta é delimitada por 2 zonas, uma em que as propriedades da interfase coincidem com as propriedades do aderente, e uma outra em que as propriedades da interfase coincidem com as propriedades do adesivo. A interfase caracteriza-se pela existência de diferentes propriedades em diferentes zonas, resultado da interação entre o adesivo e o aderente. A interface ou camada limite é um plano de contacto entre o aderente e o adesivo e está localizada dentro da interfase. De notar que numa interfase podem existir várias interfaces, resultantes da existência de diferentes materiais entre o adesivo e o aderente. O primário é uma substância aplicada no substrato, que tem o objetivo de melhorar o processo de adesão, ou a proteção do substrato até a aplicação do adesivo.

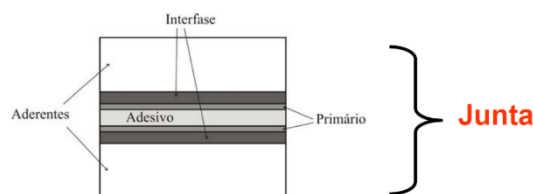


Figura 3 - Representação de uma junta adesiva (Adaptado de [9])

Na formação de uma junta adesiva consegue-se definir 3 estádios distintos. Primeiramente o adesivo deve estar na fase líquida, de forma a espalhar-se com facilidade na superfície e a criar um contacto molecular “íntimo” com os substratos. Após esta fase, o adesivo deverá endurecer, a fim de a junta poder suportar as cargas que serão aplicadas durante o seu serviço. Por fim, é necessário perceber que a capacidade de suportar cargas e o próprio tempo de vida da junta são afetados por diversos fatores. Referem-se como exemplo a forma de como as forças são aplicadas e o meio ambiente a que a ligação vai estar sujeita. Desta forma, é necessário ter um conhecimento de muitas ciências, como química, física ou engenharia de materiais para se conseguir uma eficaz aplicação desta tecnologia [10]. As ligações adesivas apresentam um enorme número de vantagens [2]:

- Facilidade de realização;

- Boas cadências de produção;
- Boa resistência à fadiga;
- Boa distribuição de tensões ao longo da ligação;
- Bom amortecimento de vibrações;
- Permite a ligação entre vários diferentes pares de materiais, o que torna o projeto da junta muito flexível;
- Permitem estruturas com contornos regulares, ao evitar furos ou marcas de soldadura;
- Dependendo da aplicação e do adesivo em causa, projetos que envolvem juntas adesivas tendem a ser mais económicos.

Por outro lado, existem também algumas desvantagens a serem consideradas na utilização de adesivos [11]:

- O projeto da junta tem de eliminar ao máximo forças de arrancamento e clivagem (principais inimigos das ligações adesivas);
- Necessário usar geometrias que evitem tensões localizadas e distribuição uniforme de tensões a fim de evitar forças de arrancamento e clivagem;
- Limitada resistência a condições externas, dada a natureza polimérica do adesivo;
- A ligação não é realizada instantaneamente, o que leva ao uso de ferramentas de fixação (desvantagem económica);
- Necessária preparação cuidada da superfície;
- Os adesivos normalmente são curados a altas temperaturas, o que leva à utilização de fornos ou prensas;
- Difícil controlo de qualidade;
- Não existe um critério de dimensionamento universal para qualquer junta. Existem muitos que funcionam bem em certas situações.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

O desenvolvimento das juntas adesivas estruturais ocorreu sobretudo durante o século XX, muito por causa do grande crescimento que a indústria aeronáutica registou neste período. Os adesivos de eleição no início do século eram baseados sobretudo em caseína, um material polimérico natural derivado do leite [10]. O grande problema dos adesivos naturais é que funcionam bastante mal quando submetidos a ambientes muito húmidos, isto é, ao absorver água, estes tornavam-se fracos e emitiam odores desagradáveis. Este problema foi ultrapassado nos anos 40 do século XX com a descoberta de adesivos sintéticos poliméricos. Um exemplo conhecido é o do famoso caça britânico mosquito (Figura 4), criado durante a segunda guerra mundial, que usava uma resina de ureia-formaldeído para colar a sua estrutura de madeira [10].

Durante o século XX, a indústria aeronáutica e as ligações adesivas têm colaborado mutuamente nos seus respetivos desenvolvimentos. Atualmente, a aplicação de ligações adesivas é já muito mais comum e generalizada.



Figura 4 - Caça britânico mosquito [12]

A indústria automóvel tem tido, nos últimos anos, uma preocupação em reduzir ao máximo o peso dos veículos, a fim de reduzir consumos e aumentar a velocidade dos transportes (Figura 5). Para cumprir esta marca recorreu-se ao uso de materiais leves, como alumínio e plásticos reforçados com fibras. Para realizar a ligação entre estes materiais usam-se adesivos, já que os métodos tradicionais como a soldadura ou a ligação mecânica não são os mais aconselháveis [10]. Por outro lado, a utilização das próprias juntas adesivas conduz a uma redução da massa da estrutura em questão, o que acaba por ir de encontro aos requisitos já enunciados. O uso de adesivos em automóveis foi utilizado pela primeira vez na colagem de para-brisas e vidros traseiros. Mais tarde, o uso de adesivos foi expandido para preenchimento de vazios ou lacunas e, posteriormente, foram considerados adesivos para melhorar a rigidez à torção da estrutura do automóvel, observando-se também em paralelo um aumento da resistência à corrosão da mesma.

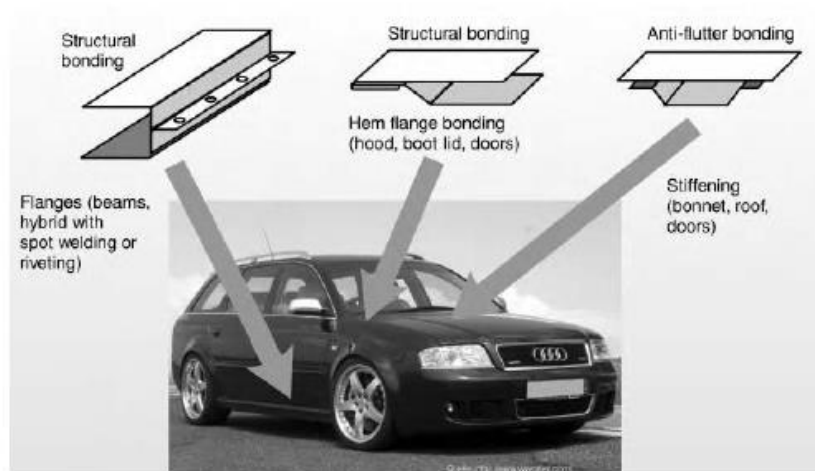


Figura 5 - Alguns locais de aplicação de adesivos estruturais na carroçaria de um automóvel [13]

A partir dos anos 90, os adesivos de elevada resistência e absorção de energia passaram a ser utilizados como elementos estruturais da carroçaria (Figura 5), uma vez que estes são excelentes para casos de acidentes. Os adesivos mais utilizados no ramo automóvel são os poliuretanos, poliuretanos híbridos, epóxidos, epóxidos híbridos, fenólicos, fenólicos híbridos e poliimidas [14].

A indústria da construção civil é um dos maiores mercados de adesivos e selantes em toneladas e capital monetário, uma vez que estão envolvidas grandes superfícies em contacto [15]. Atualmente, o setor das embalagens possui a maior fatia do mercado de adesivos e selantes (28%), enquanto a construção civil e transportes surgem de seguida com 17%. No entanto, dados de mercado apontam que o setor da engenharia civil é aquele que possui um crescimento mais acelerado [16]. A utilização de adesivos é já uma prática recorrente há algumas décadas para elementos não estruturais sendo que, mais recentemente, este uso expandiu-se para elementos estruturais, com a execução de painéis *sandwich* ou na fabricação de perfis de alumínio ou de vidro. Um exemplo concreto está representado na Figura 6 onde se observa a aplicação de adesivo para a criação de um muro de tijolos. Os adesivos também são utilizados tanto para reparação ou reforço de estruturas, como na edificação de novas construções, e a sua versatilidade permite utilizações semelhantes tanto em estruturas de betão como em estruturas de aço [17].



Figura 6- Aplicação de adesivo estrutural na união de tijolos [18]

A evolução da indústria de construção naval também tem convergido para uma utilização cada vez mais crescente de adesivos na conceção de navios. A Figura 7 representa algumas zonas do navio onde a aplicação de adesivos é recorrente. Historicamente, resinas à base de caseína e formaldeído têm sido utilizadas como adesivos na construção de barcos de madeira. Em 1950, após a introdução das resinas de poliéster na indústria marítima, a Scott-Bader Company construiu o primeiro navio

em compósito com resina poliéster reforçado com fibra de vidro. Esta primeira construção levou muitas outras empresas a construir navios em material compósito em detrimento da produção de barcos de madeira [19]. No que diz respeito ao futuro desta indústria, existem algumas tecnologias em desenvolvimento, para as quais a utilização de adesivos será indispensável. Uma tecnologia em causa é o *low energy ship*, onde se pretende uma utilização alargada de adesivos a fim de reduzir o peso do navio e conseqüentemente o consumo do mesmo [20].

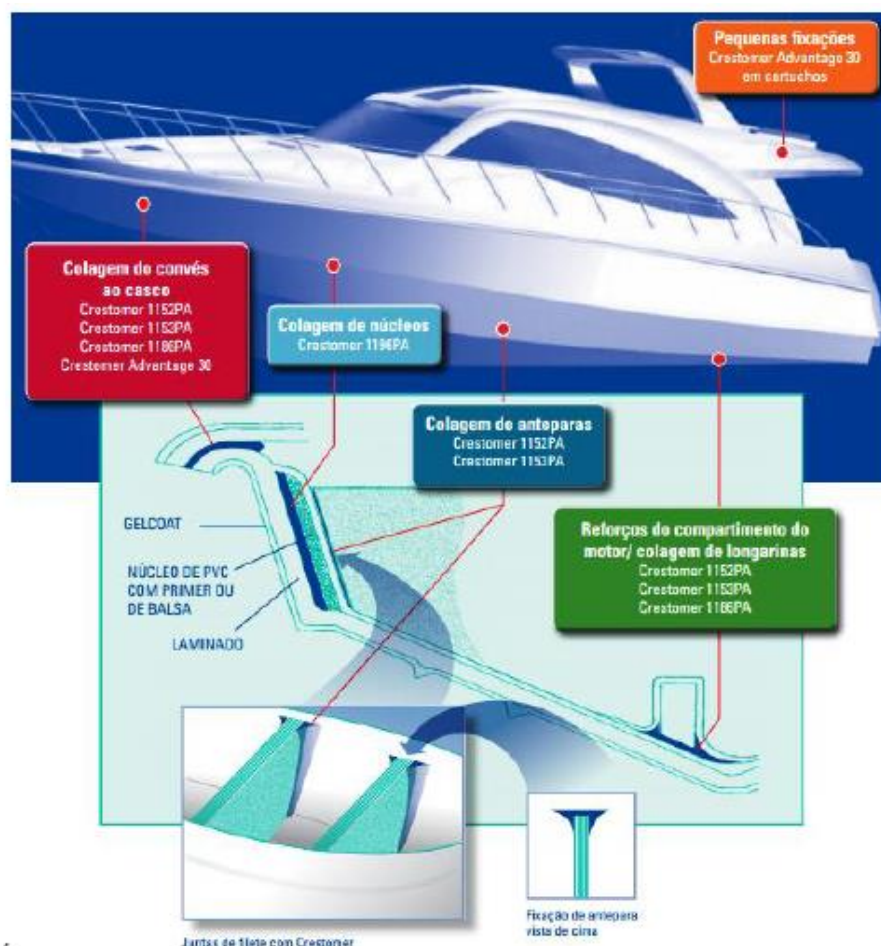


Figura 7 - Esquema representativo das diversas aplicações de um adesivo num barco em polímero reforçado com fibra de vidro [21]

A indústria eletrónica também constitui um mercado onde a aplicação de ligações adesivas é também já diversificada, onde se estima que estejam em circulação aproximadamente 50000 diferentes tipos de adesivos condutores e não condutores. A utilização de ligações adesivas é de grande importância, uma vez que é possível implementar os mesmos em sistemas eletro-termo-mecânicos, a fim de ter uma alta performance e proteção às ligações elétricas [13]. Os primeiros adesivos a serem utilizados na indústria eletrónica consistiam em polímeros fotossensíveis. Entre 1960 e 1970, os plásticos foram substituindo os metais e os cerâmicos, no encapsulamento de microprocessadores e, em 1966, a empresa Epoxy Technology Inc propôs a utilização

de resinas epóxicas com prata para a ligação de circuitos integrados ao seu *mainframe*. A Figura 8 mostra a evolução dos adesivos usados na indústria eletrônica e suas aplicações [22].

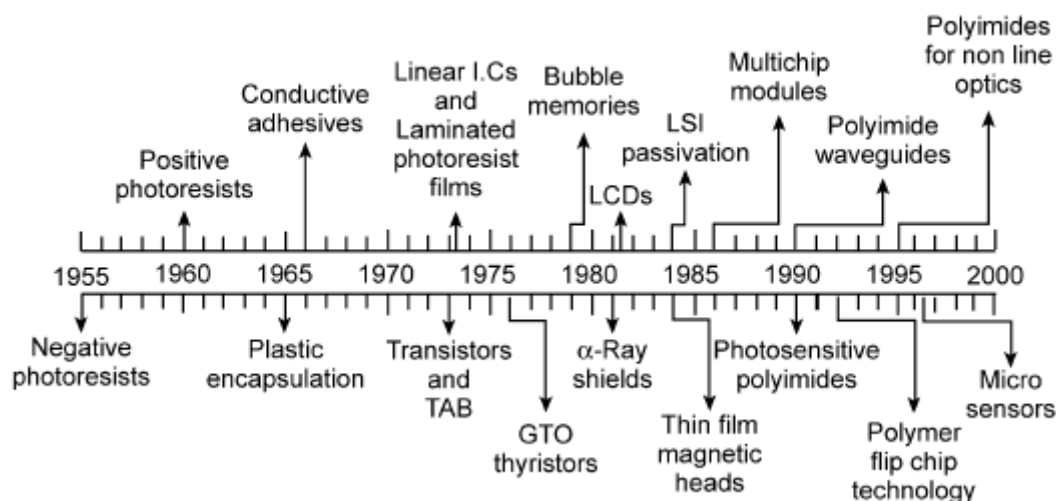


Figura 8 - Dados de aplicação de polímeros orgânicos na indústria eletrônica e suas principais aplicações [22]

Os adesivos têm sido utilizados na indústria do calçado desde os anos 50 como alternativa à costura ou à aplicação de pregos, agramos ou tachas, para ligar a base do sapato à sua cobertura. Com o uso de adesivos, conseguem-se juntas mais flexíveis e homogêneas com distribuição de tensões uniforme ao longo de todo o sapato e melhores propriedades estéticas do mesmo. Dependendo do tipo de calçado, pode-se ter diferentes requisitos para o adesivo a utilizar. Por exemplo, a escolha de um adesivo a usar num sapato de uso casual não é de grande importância, pois a durabilidade requerida não é muito alta, podendo-se optar por um adesivo mais barato e de propriedades mais modestas. Por outro lado, em sapatos desportivos, é necessário ter em conta fatores como o baixo peso, alto desempenho ao impacto e à flexão, alto conforto e alta durabilidade, que convergem para a escolha de adesivos mais caros, mas com propriedades muito superiores às que seriam necessárias para sapatos de uso casual. A Tabela 2, representa alguns adesivos usados na criação de calçado [13].

Tabela 2 - Exemplos de adesivos requeridos para cada operação realizada no fabrico de um sapato (adaptado de [13])

| Operação de fabrico do sapato | Adesivo |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Montagem | adesivo elastómero |
| Cobertura do calcanhar | Poliuretano |
| Junção do calcanhar com a sola | Poliéster <i>hot-melt</i> |
| Acessório de elevação | Poliéster <i>hot-melt</i> |
| Furação das meias de revestimento | Policloropreno |
| Ligação superior à sola | Poliuretano, policloropreno |

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Dependendo da aplicação para as quais as juntas adesivas são concebidas, estas podem exibir variados comportamentos. É importante, no projeto de uma junta adesiva, saber de antemão os carregamentos a que ligação adesiva estará a ser submetida, de modo a prever o seu comportamento e carga de rotura. No que diz respeito a esforços, uma junta adesiva pode estar submetida a esforços de tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento [2].

Quando as juntas são submetidas a um carregamento de tração (Figura 9), as tensões resultantes atuam perpendicularmente ao plano de colagem, no qual a distribuição das tensões normais acaba por ser uniforme ao longo do L_0 , exceto nas extremidades da junta, onde ocorrem picos de tensão devido à ocorrência de clivagem e de arrancamento nestas zonas [23].

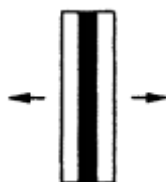


Figura 9 - Representação de um esforço de tração numa junta [24]

Num carregamento de compressão (Figura 10), os aderentes são comprimidos um contra o outro. A distribuição de tensões neste caso é igual à que ocorre quando a junta está à tração, ou seja, as tensões são constantes ao longo do L_0 , ocorrendo picos de tensão nas extremidades. Na realidade, qualquer junta sujeita a compressão pura não precisa de recorrer ao uso de adesivo pois, desde que a força seja elevada o suficiente, os aderentes não apresentam movimento relativo entre si [2, 23].

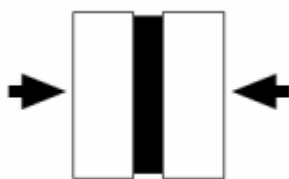


Figura 10 - Representação de um esforço de compressão numa junta [2]

Quando uma junta está sujeita a esforços de corte (Figura 11), ocorre escorregamento entre os aderentes. A distribuição de tensões ao longo da zona de ligação encontra-se representada na Figura 12. De notar que as tensões máximas se encontram nas extremidades da junta, enquanto as mínimas ocorrem no centro [25-30]. Este comportamento é devido à deformação diferencial dos aderentes ao longo do L_0 da junta, na medida em que a taxa de deformação axial dos aderentes ao longo da adesivo diminui no sentido da extremidade livre de cada aderente [31-34]. Assim,

ao aumentar progressivamente L_o , a resistência da junta aumenta, mas a uma taxa decrescente, por causa do efeito cada vez mais acentuado da deformação diferencial dos substratos. Por outro lado, verifica-se que um aumento da largura causa um aumento proporcional da resistência da junta (Figura 13) [2].

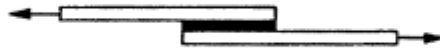


Figura 11 - Representação de um esforço de corte numa junta [24]

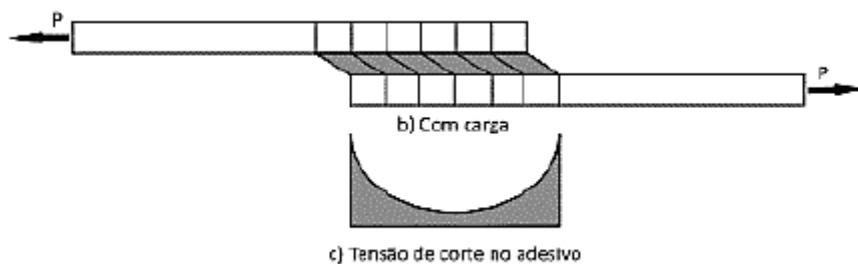


Figura 12 - Distribuição de tensões numa junta adesiva submetida a corte [35]

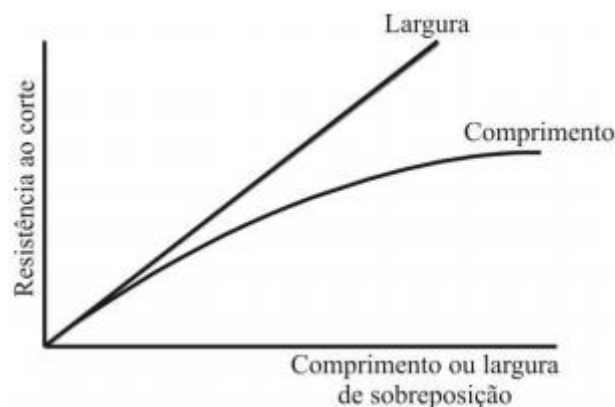


Figura 13 - Variação da resistência ao corte de uma junta em função do seu comprimento e da sua largura [2]

A clivagem ocorre quando uma das extremidades da junta está a ser tracionada (Figura 14). O arrancamento (Figura 15) é um caso muito semelhante, só que nesta situação um ou os dois aderentes são bastante flexíveis, o que pode causar deformação de forma plástica por ação do carregamento imposto na junta [23]. Para ambos estes casos, existe obviamente um pico de tensão na extremidade que está a ser solicitada. A Figura 16 representa a distribuição de tensões em ambas as situações [2].



Figura 14 - Representação de um esforço de clivagem numa junta [2]

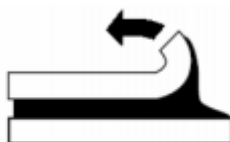


Figura 15 - Representação de um esforço de arrancamento numa junta [2]

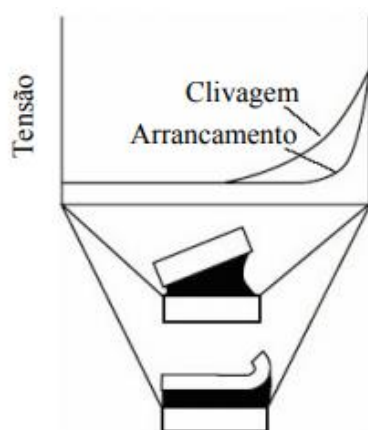


Figura 16 - Distribuição das tensões ao longo de uma junta submetida a esforços de clivagem e arrancamento [2]

Uma vez que existe grande concentração de tensões numa área bastante reduzida e localizada, as juntas solicitadas à clivagem e ao arrancamento tendem a ser muito pouco resistentes. Desta forma, deve-se evitar ao máximo a presença destes dois esforços numa junta adesiva, que deve ser maioritariamente solicitada ao corte [23]. No caso de JSS, isto não é verdade, pois, uma vez que as forças de tração não estão alinhadas, estas vão induzir um momento fletor nas extremidades da sobreposição. Este, por sua vez, provoca tensões de arrancamento significativas no adesivo, causando também a deformação dos substratos da junta [36], como demonstrado na Figura 17. Este efeito é eliminado com a utilização de juntas de sobreposição dupla (JSD), onde não ocorre flexão significativa dos aderentes [35].

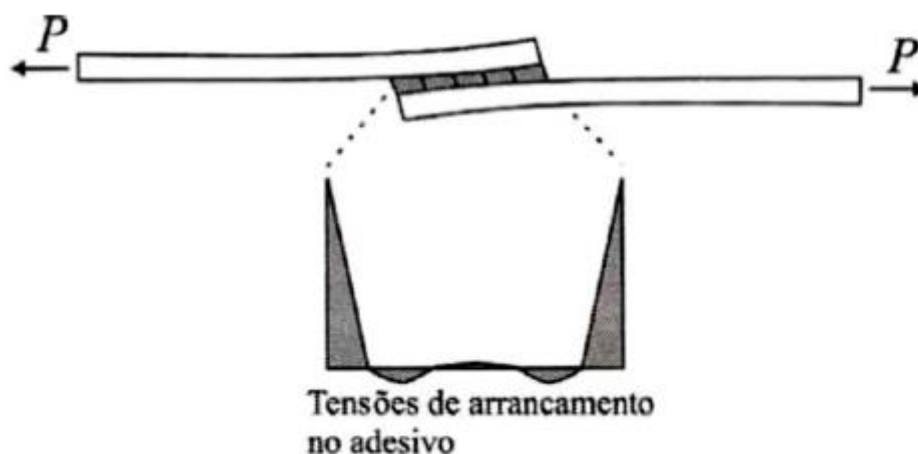


Figura 17- Representação do fenômeno de arrancamento e suas tensões numa JSS [36]

Também tem de se considerar a ductilidade e rigidez do adesivo, pois estes fatores afetam significativamente a resistência da junta quando esta é submetida a clivagem ou arrancamento. Verifica-se que adesivos frágeis e rígidos são muito propícios a um mau desempenho sobre a presença destes esforços, uma vez que o dano no adesivo se inicia na extremidade solicitada para deformações muito reduzidas do adesivo. Os adesivos dúcteis e flexíveis permitem uma melhor distribuição de tensões ao longo do adesivo, dada a sua capacidade muito superior de se deformarem, o que por sua vez acaba por aumentar a resistência da junta [37].

No que diz respeito à rotura do adesivo, a norma ASTM D 5573 – 99 prevê sete modos de rotura, entre os quais os mais comuns de ocorrer são a rotura coesiva, a rotura adesiva, a rotura mista e a rotura pelo aderente, demonstradas na Figura 18.

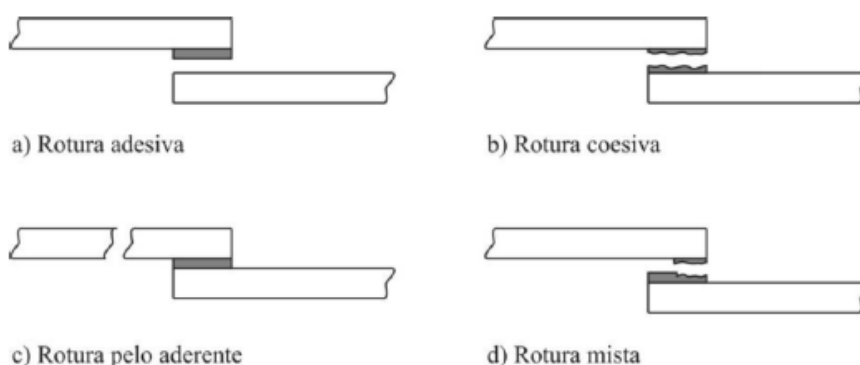


Figura 18 - Representação dos 4 modos de rotura que podem ocorrer numa junta adesiva [2]

A rotura coesiva ocorre quando a resistência da ligação entre o adesivo e respectivo aderente é maior que a própria resistência interna do adesivo, pelo que a junta acaba por falhar pela rotura do adesivo. Também pode ocorrer rotura do aderente, por este ter uma resistência inferior à do adesivo e à da ligação entre adesivo e aderente [2].

A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Nesta situação, a superfície de um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo, enquanto o outro aderente se apresenta coberto com o adesivo. A ocorrência deste tipo de rotura indica a existência de alguma falha na adesão entre o adesivo e a superfície do aderente, sendo a causa mais provável a má preparação das superfícies a serem coladas [2].

A rotura mista tem características de rotura adesiva e rotura coesiva ao mesmo tempo. A ocorrência deste tipo de rotura indica a má preparação do adesivo ou problemas do adesivo, tais como impurezas ou a passagem do prazo de validade do mesmo [38].

O modo de rotura preferencial a ocorrer numa junta será o coesivo, quer seja no aderente ou no adesivo, pois nestas situações está a ser aproveitada a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta. Assim sendo, uma junta que acaba por romper de forma coesiva é prova de que a mesma foi bem concebida [2].

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Na conceção de uma junta adesiva, o fator determinante para o seu desempenho é a garantia de que o adesivo seja solicitado na sua direção mais resistente [23]. Dependendo da aplicação para qual a junta é criada, existe uma variedade de configurações possíveis para que a mesma tenha o melhor desempenho possível.

A configuração mais comum é a chamada JSS (Figura 19). Isto é devido ao facto de estas serem extremamente fáceis de se fabricar. Outra grande vantagem é que o adesivo estará a ser solicitado maioritariamente ao corte, o que, como já foi visto, é o esforço preferencial a que a ligação adesiva deve estar sujeita [10].



Figura 19 – Esquema de uma JSS [2]

Por outro lado, as forças, não sendo colineares, vão induzir tensões de arrancamento nas extremidades resultantes do momento fletor gerado pelo carregamento imposto. Para evitar a ocorrência deste problema, existem 3 configurações possíveis para aumentar a performance de uma JSS (Figura 20, Figura 21 e Figura 22) [23].

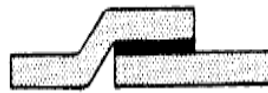


Figura 20- Junta de sobreposição com ressalto [23]

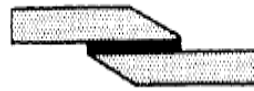


Figura 21 - Junta de sobreposição com chanfro [23]



Figura 22 – Esquema de uma JSD [23]

A junta com ressalto é a solução mais simples para contornar o problema de arrancamento associado às JSS, dado que elimina o desalinhamento entre os aderentes. A JSD tem uma construção que permite a redução mais drástica de momento fletor. No entanto, é de fabricação mais complicada, pois exige o gasto de uma maior quantidade de adesivo e do uso de dois aderentes de um dos lados da ligação. A utilização de juntas com chanfros permite uma redução das concentrações de tensão, como mostrado na Figura 23 [23].

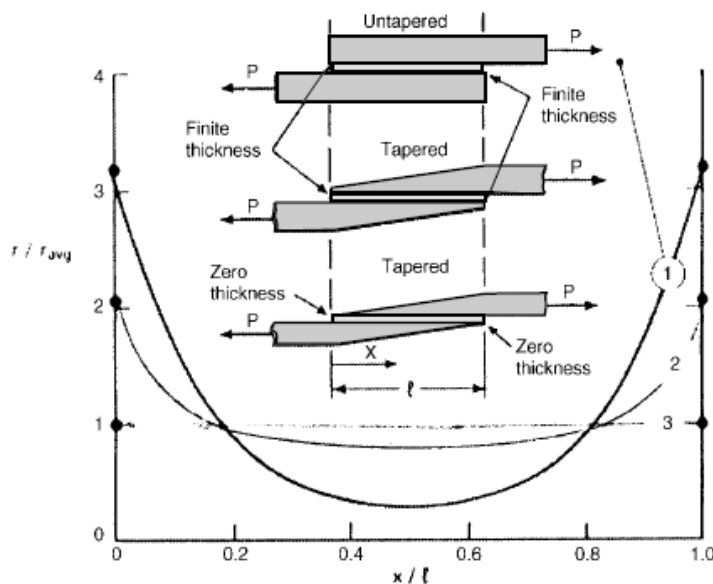


Figura 23 - Variação das tensões de corte numa JSS: (1) JSS convencional; (2) JSS com chanfro e espessura finita de adesivo e (3) JSS com chanfro e sem espessura de adesivo [23]

Vê-se nesta figura que a aplicação de chanfros em JSS causa uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo da junta adesiva. Por outro lado, os picos de tensão

nas extremidades da ligação são bem menores, o que causa um aumento da capacidade de carga da própria junta (Figura 24). De notar também que a criação de chanfros faz com que ocorra uma redução de material dos aderentes nessa zona, o que acaba por diminuir a sua rigidez. Assim, a rigidez à flexão dos aderentes também é menor, o que diminui os picos de tensão nas extremidades da junta [23, 39].

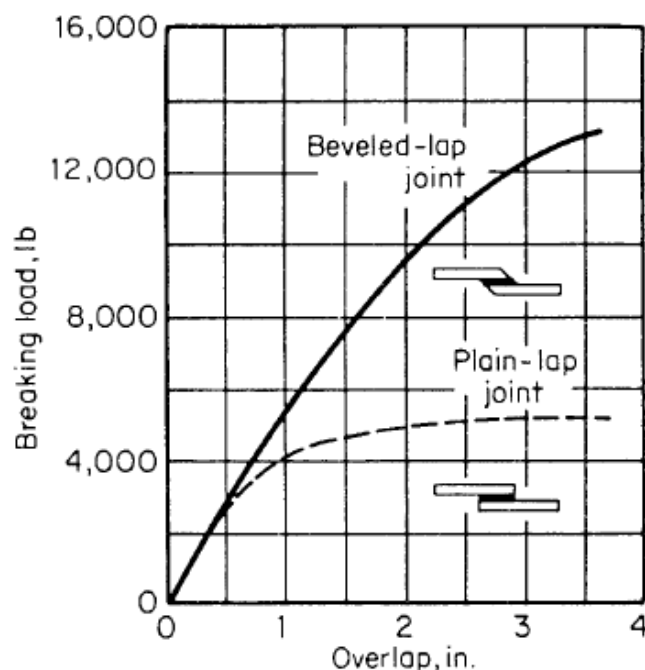


Figura 24 - Influência do chanfro e correspondente aumento da capacidade de carga da junta [23]

As juntas topo a topo são as juntas mais simples de serem fabricadas. O grande problema deste tipo de ligação é a sua baixa resistência, dado que os esforços de flexão introduzem clivagem no adesivo. A fim de viabilizar o uso de juntas topo a topo em projetos de ligações adesivas, pode-se recorrer às modificações demonstradas na Figura 25 [10].

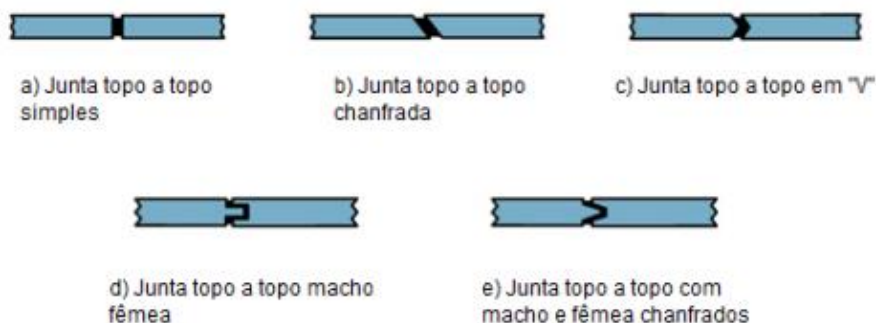


Figura 25 - Configurações possíveis para juntas topo a topo [40]

Todas as configurações demonstradas, de b) até e), conseguem reduzir o efeito da clivagem induzido por carregamentos laterais. Relativamente às juntas topo a topo

simples (junta a), as juntas com chanfro (junta b) e em “V” (junta c), estas permitem um melhor alinhamento das forças, enquanto as juntas topo a topo com macho e fêmea (junta d; junta e), permitem alojar uma maior quantidade de adesivo e garantem um melhor centramento dos substratos, o que causa um incremento da área adesiva e, conseqüentemente, uma melhoria da resistência da junta [23, 39].

As juntas com tiras, cujas configurações possíveis estão demonstradas na Figura 26, servem para alinhar as cargas de trabalho em aplicações onde a utilização de JSS não é possível ou recomendada, por causa da espessura do aderente. É normal a utilização de juntas com 2 tiras, para reduzir o momento fletor e conseqüentemente diminuir os efeitos de arrancamento sobre a junta. As tiras com chanfro e as juntas com tira dupla e duplo rebaixo são muito eficientes, mas precisam de maquinagem, o que torna a fabricação destas juntas mais complicada, demorada e cara [23].

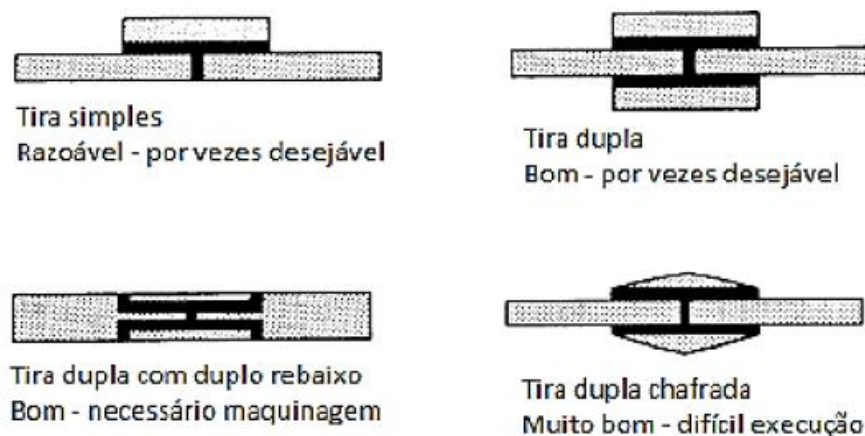


Figura 26 - Algumas configurações para juntas em tira (Adaptado de [23])

As juntas tubulares ou cilíndricas são normalmente usadas quando se pretende fazer a colagem de varões ou tubos. Estas possuem uma grande vantagem relativamente às juntas de topo a topo, pois consegue-se nas juntas tubulares uma maior área resistente, com conseqüente diminuição dos efeitos de arrancamento na junta [10]. Relativamente às suas desvantagens, nota-se a grande dificuldade de inspeção da junta pelo interior, o facto de serem requeridas operações de maquinagem para esta junta e uma dificuldade acrescida na aplicação do adesivo, sendo por vezes necessário recorrer ao uso de orifícios para injetar o adesivo na junta, sendo que estes também podem ser usados para baixar a pressão no interior da junta. De notar ainda que é recomendado o uso de espaçadores em todas as configurações de juntas tubulares, como um fio por exemplo, de forma a garantir um alinhamento dos tubos e uma espessura constante de adesivo. Para finalizar a montagem da junta deve-se efetuar uma rotação dos substratos cilíndricos, a fim de espalhar o adesivo e uniformizá-lo na junta [23, 39, 41]. A Figura 27 representa ligações em varões e em tubos, que são as configurações de juntas tubulares mais comuns na indústria.

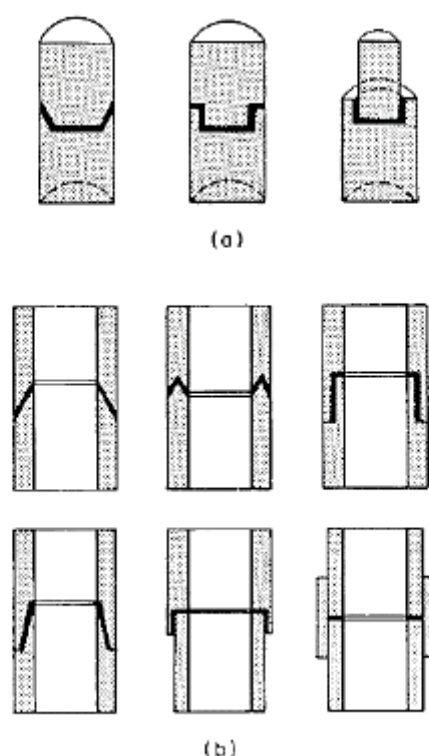


Figura 27 - Configurações possíveis para juntas tubulares: a) Ligações em varões; b) Ligações em tubos (Adaptado de [23])

Uma outra configuração existente são as chamadas juntas em T, nas quais os aderentes estão dispostos de modo a fazerem um ângulo entre si. Normalmente a predisposição dos aderentes neste tipo de juntas é de 90° , mas existem também juntas nas quais o ângulo é diferente de 90° , como demonstrado na Figura 28. O carregamento neste tipo de juntas é efetuado na direção normal (N) ou transversal (T). As tensões provocadas pelo carregamento normal são as mais prejudiciais ao funcionamento da junta, pois a resistência da ligação para este tipo de esforço é mais baixa. As juntas em T podem também estar sujeitas a esforços de compressão (juntas i e j da Figura 28). Neste caso, pode ocorrer encurvadura no aderente disposto ao longo da direção N , caso este não tenha a rigidez necessária. Aqui, o arrancamento do adesivo causado pela encurvadura do substrato é naturalmente mais gravoso no caso junta i). Para evitar os efeitos da compressão na direção normal, podem-se utilizar as configurações de junta d), e), f), g) e h) da Figura 28, que são mais resistentes, mas não infalíveis ainda assim. De notar ainda a junta k) da Figura 28, em que o substrato inferior é ranhurado. Caso a profundidade do rasgo seja insuficiente, a junta poderá estar exposta aos problemas de compressão e encurvadura já referenciados. Apesar desta junta ranhurada ter melhor desempenho do que as outras, o seu custo é superior, uma vez que o fabrico desta implica a existência de maquinagem [39, 41].

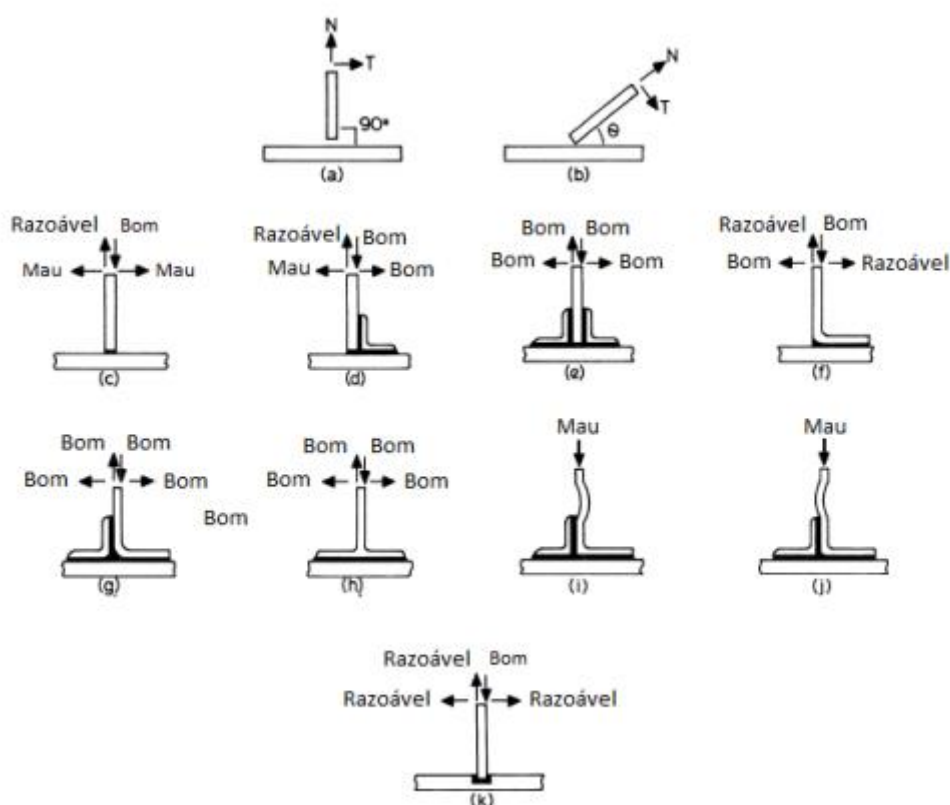


Figura 28 - Configurações possíveis para juntas em T (Adaptado de [31])

Finalmente, referem-se as juntas de canto que, tal como as juntas em T, dividem-se em juntas com substratos alinhados a 90° e juntas com substratos alinhados a um ângulo diferente de 90°. Os carregamentos também podem ser efetuados na direção normal (N) e na direção transversal (T), como representado na Figura 29, que indica algumas configurações possíveis para juntas de canto. Ao realizar o projeto de juntas de canto, também é necessário considerar que um carregamento de compressão na direção normal pode induzir encurvadura lateral do substrato vertical e causar arrancamento do adesivo. Relativamente às configurações demonstradas na Figura 29, a junta c) é a que apresenta o pior desempenho, enquanto a junta d) apresentam bom comportamento em todas as direções, exceto numa em que a resistência é um pouco inferior. A junta e) também tem bom desempenho, mas é de difícil montagem e são necessárias operações de dobragem para fabricar as juntas d) até à k). No que diz respeito a aplicação, as juntas de canto podem ser utilizadas em reservatórios cúbicos ou paralelepípedicos sujeitos a pressão interna sendo que, para estes casos, as juntas i) e h) da Figura 29 são as mais adequadas, apesar de ambas apresentarem baixa resistência no plano da ligação, problema este resolvido com a aplicação de um reforço (junta k da Figura 29) [39, 41].

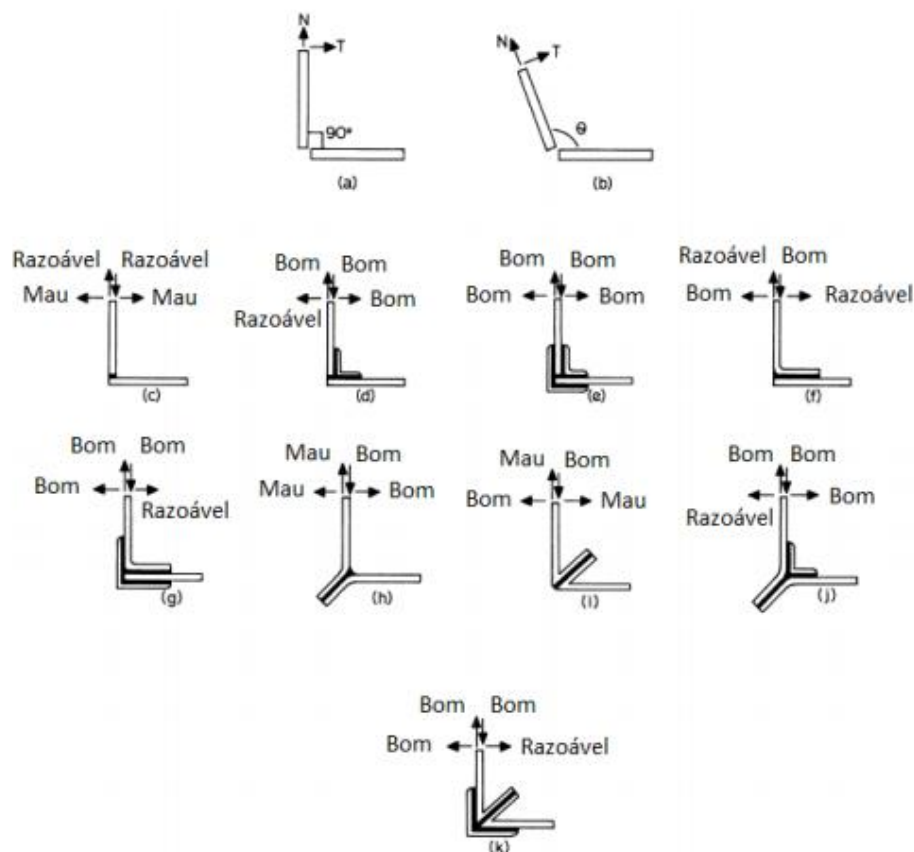


Figura 29 - Configurações possíveis para juntas em canto (Adaptado de [31])

2.2 Alterações geométricas em juntas adesivas

Dada a crescente necessidade em utilizar ligações adesivas na indústria, foi necessário estudar o mais fundo possível sobre os vários fatores que podem afetar a resistência de uma junta adesiva tais como as características mecânicas do adesivo e do substrato, tratamento superficial dos substratos, solicitações a que junta está sujeita e ainda fatores relacionados com a geometria da junta.

2.2.1 Comprimento de sobreposição

Nas ligações adesivas, normalmente o local sujeito às maiores tensões são as extremidades da junta. A tensão média é inferior à tensão registada nas extremidades da junta, sendo que essa distribuição não uniforme das tensões ao longo da zona de colagem provoca a rotura da ligação para cargas de valor mais baixo às que o adesivo consegue aguentar. Verifica-se que a resistência da junta aumenta com pequenas variações do valor do L_o e t_p . No entanto, a relação entre a resistência da junta e o valor do L_o da junta não segue uma relação de proporcionalidade direta, mas rege-se

por leis logarítmicas, como se pode ver pelo seguinte gráfico, no qual, partir de um dado L_0 , a resistência da junta mantém-se igual (Figura 30).

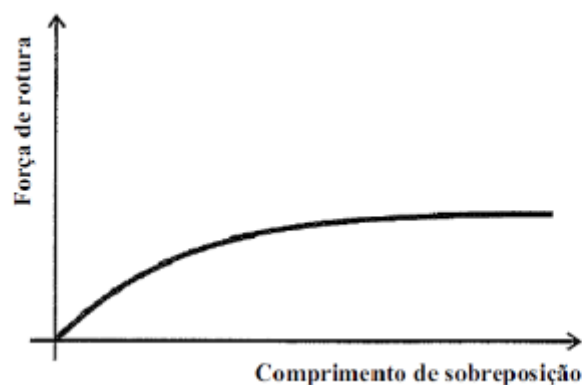


Figura 30 - Resistência de uma junta adesiva em função do L_0 [10]

Verifica-se ainda que, para adesivos frágeis e substratos de aço com alta resistência, a partir de um dado valor de L_0 , um aumento deste não afeta em nada a resistência da junta, já que a mesma é ditada pelas características do adesivo. Por outro lado, para substratos que tem elevada capacidade de deformação plástica, a resistência da junta é definida pelas características dos substratos, sendo que a partir de um dado valor do L_0 não existe qualquer aumento na resistência da junta. Assim, o L_0 , cedência do substrato e tipo de substrato podem ser tratados em conjunto [42]. A Figura 31 representa um gráfico que mostra as diferenças observadas entre adesivos dúcteis e frágeis, no que diz respeito à influência do L_0 na resistência de uma junta. Verifica-se que, para baixos L_0 , juntas com adesivos frágeis tem uma resistência um pouco superior às juntas com adesivos dúcteis. No entanto, a partir de um dado L_0 , os adesivos dúcteis começam a proporcionar uma maior resistência à ligação adesiva, sendo esta diferença maior à medida que se aumenta o L_0 [43].

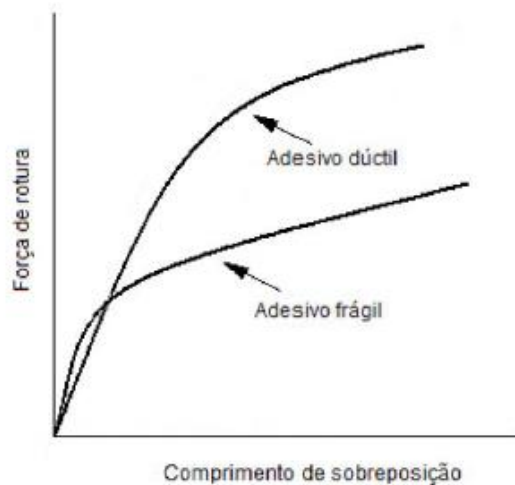


Figura 31 - Força de ruptura de uma ligação adesiva em função do L_0 para adesivos frágeis e dúcteis [23]

Para o caso particular de juntas de alumínio, Pereira et al. [44] verificaram que o aumento do L_o aumenta tanto a rigidez da junta, como a carga de rotura. Constata-se assim que menos flexibilidade resulta numa junta com resistência superior.

2.2.2 Espessura dos aderentes

O t_p é também um parâmetro que influencia a resistência de uma junta adesiva. Ao considerar uma JSS, como já foi visto, devido à sua geometria, podem ocorrer momentos fletores, quando solicitados a junta é solicitada à tração. Este momento fletor depende de t_p e da espessura do adesivo (t_a). Ao aumentar t_p , o momento fletor em relação ao eixo médio da junta adesiva aumenta, uma vez que a solicitação é aplicada a uma distância maior do mesmo. Com o aumento do momento fletor, naturalmente a resistência da junta decresce. No entanto, há casos em que é benéfico aumentar-se t_p , como é por exemplo, no caso de substratos de aço macio em que para aumentar a rigidez do mesmo e torná-lo menos suscetível à deformação plástica [42]. No caso de juntas com aderentes de alumínio, segundo Pereira et al. [44], concluiu-se que um aumento de t_p de 1 mm para 1,5 mm aumentou a sua resistência ao corte, ou seja, um aumento da rigidez da junta adesiva contribuiu para o aumento da sua resistência. A Figura 32 representa esse mesmo efeito verificado em juntas de alumínio.

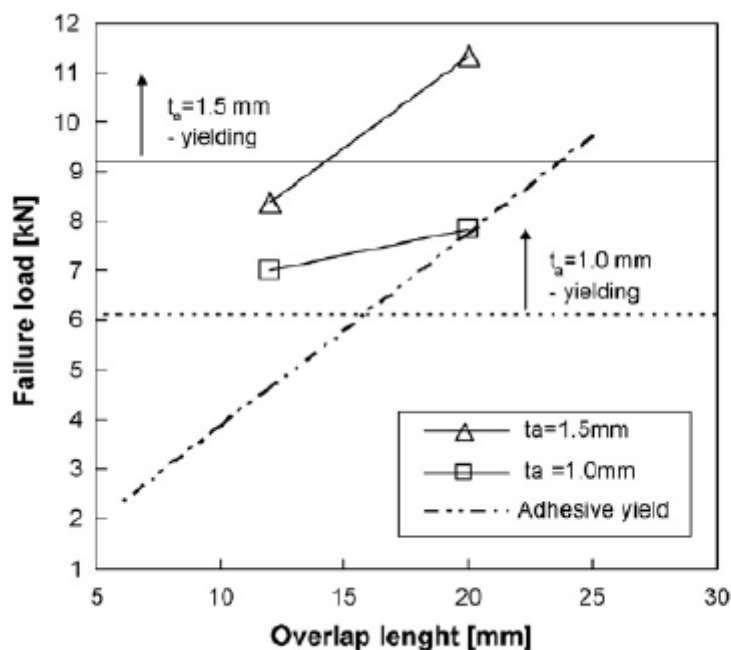


Figura 32 - Efeito da espessura do substrato de alumínio na resistência de juntas adesivas [44]

2.2.3 Utilização de filetes de adesivo

Outro fator a ter em consideração na previsão da resistência de uma junta adesiva é a existência de filetes (Figura 33) nas extremidades de uma junta adesiva. De facto, existe sempre nesta localização excesso de adesivo que é expulsado da zona de colagem, acabando por formar dois filetes, após a cura do adesivo. Estes filetes são benéficos para o desempenho de juntas, sobretudo se os substratos forem de material compósito, pois causam uma redistribuição das tensões na área de colagem, aliviando os picos de tensão de corte e arrancamento nas extremidades da junta. Este facto é comprovado por vários estudos [45-53], que comprovam que a presença de filetes numa ligação adesiva permite reduzir em cerca de 50% os ditos picos de tensão nas extremidades da zona de colagem da ligação adesiva [10].

O grande inconveniente da presença de filetes é quando se pretende estudar a junta adesiva com métodos analíticos. A aplicação destes métodos considera as extremidades da junta adesiva sem qualquer excesso de adesivo, não contando então com a existência de filetes, o que indica que os resultados retirados por estes métodos apresentam algumas discrepâncias com a realidade [10].

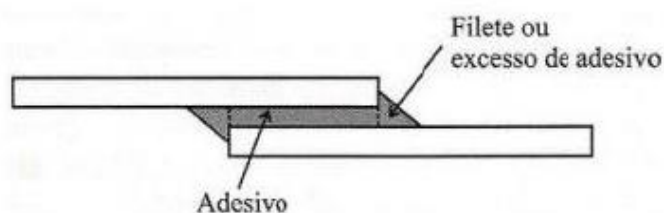


Figura 33 - Representação de um filete numa ligação adesiva [10]

2.2.4 Utilização de chanfros

Como já foi visto no capítulo 2.1.4, a utilização de chanfros (Figura 21) permite aliviar os picos de tensão e de deformação ao diminuir a rigidez nas extremidades da zona de ligação. A geometria de uma junta com chanfros torna pouco viável o uso de uma análise analítica para a previsão da resistência. Existe, no entanto uma equação criada por Cherry e Harrison, que permite a obtenção de uma forma adequada para o substrato, a fim de promover uma distribuição constante de tensões na junta adesiva [54]. Foi também realizado um estudo numérico por parte de Groth e Nordlund [55], onde se obteve o perfil otimizado mostrado na Figura 34 [10].

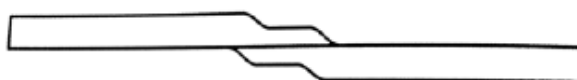


Figura 34 - Perfil com chanfro otimizado de acordo com Groth e Nordlund [10]

A junta pode ainda ser otimizada com o objetivo de minimizar ao máximo os efeitos de arrancamento em juntas adesivas. Este estudo foi realizado por Hart-Smith [56], que chegou ao perfil otimizado mostrado na Figura 35.

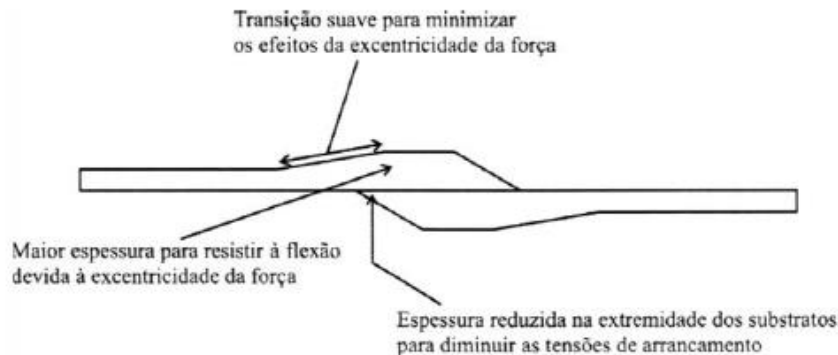


Figura 35 - Perfil otimizado de acordo com o estudo realizado por Hart-Smith (Adaptado de [56])

Adams et al. [46] realizaram um estudo onde-se procurou minimizar ao máximo o problema da rotura transversal em juntas adesivas com aderentes de material compósito. Uma das soluções encontradas para a resolução do problema foi a utilização de uma JSD, em que o substrato interno é de material compósito, no caso do estudo em causa um PRFC, e os substratos externos de aço. Foi também estudada a adição de diferentes chanfros, como mostra a Figura 36, em JSD mantendo, no entanto, o comprimento de sobreposição, de modo a obter a melhor resistência possível.

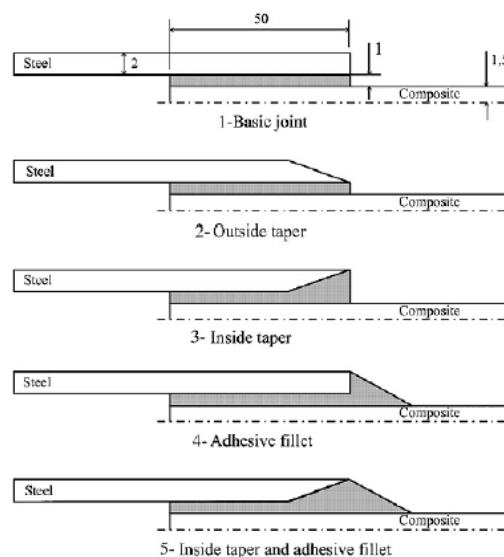


Figura 36 – JSD modificadas com chanfros: (1) JSD normal; (2) JSD com chanfro exterior; (3) JSD com chanfro interior; (4) JSD com filete de adesivo; (5) JSD com chanfro interior no aderente e filete no adesivo. As dimensões representadas estão em mm [46]

Verificou-se que as juntas 2 e 3 não apresentaram melhorias significativas em relação à primeira, enquanto que o filete da junta 4 provocou um aumento

considerável da resistência da junta. A junta 5), que tem o chanfro no substrato de aço e o filete, é a que apresenta os melhores resultados. No caso desta junta, a redução da rigidez da junta e a adição do filete reduziram as tensões transversais no compósito cerca de 6 vezes em relação à junta de base 1) [46].

2.2.5 Juntas de ressalto

A junta com ressalto surge também como uma solução face ao problema da flexão existente nos aderentes de JSS. A ideia por detrás do conceito de junta de ressalto é dobrar um dos aderentes, como demonstra a Figura 37. Com esta configuração, a excentricidade existente entre os aderentes é suprimida, assim como os efeitos de flexão nos mesmos e correspondente efeito do arrancamento do adesivo.

Taib et al. [29] estudaram as diferenças entre uma JSS e uma junta de ressalto (Figura 37), ambas com aderentes de material compósito (matriz epóxida com reforço de fibras de vidro).

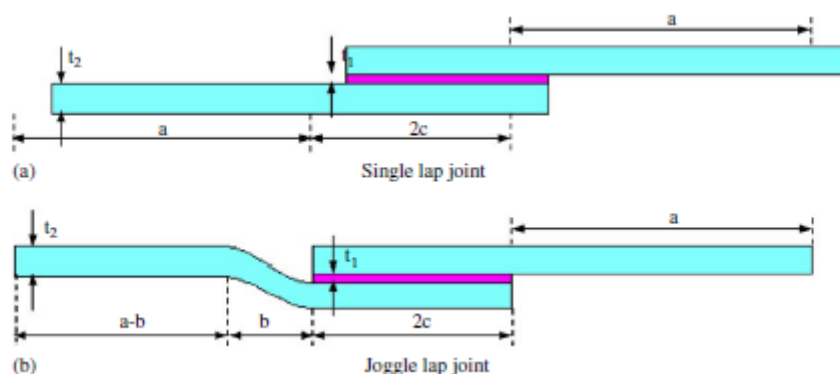


Figura 37- Configurações estudadas: (a) JSS convencional e b) junta de ressalto [29]

Para tal, foi realizada uma análise de MEF destas duas juntas, tendo em conta que já tinha sido realizado um estudo experimental prévio [30]. Para este último ponto, verificou-se que os resultados do estudo numérico coincidiam com os resultados do estudo experimental até uma carga de 2000 N, o que indica que a análise numérica constitui uma boa representação da realidade.

Relativamente aos resultados propriamente ditos, verifica-se que as juntas de ressalto resultam em tensões axiais, tensões de corte e tensões de arrancamento superiores às observadas para as JSS convencionais, para a mesma carga de tração aplicada (Figura 38, Figura 39 e Figura 40).

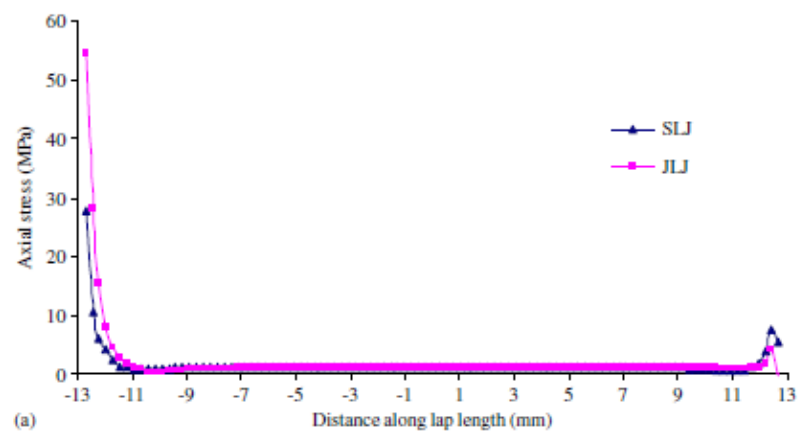


Figura 38 - Distribuição de tensões axiais ao longo do comprimento de sobreposição para juntas com ressalto (JLJ) e JSS (SLJ) [29]

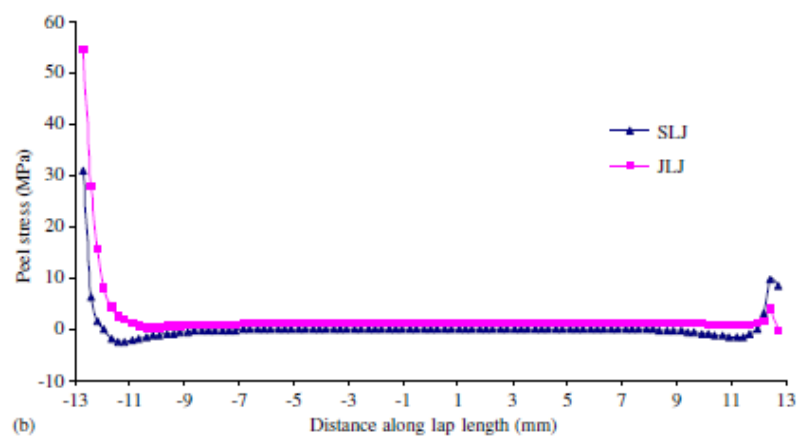


Figura 39 - Distribuição de tensões de arrancamento ao longo do comprimento de sobreposição para juntas com ressalto (JLJ) e JSS (SLJ) [29]

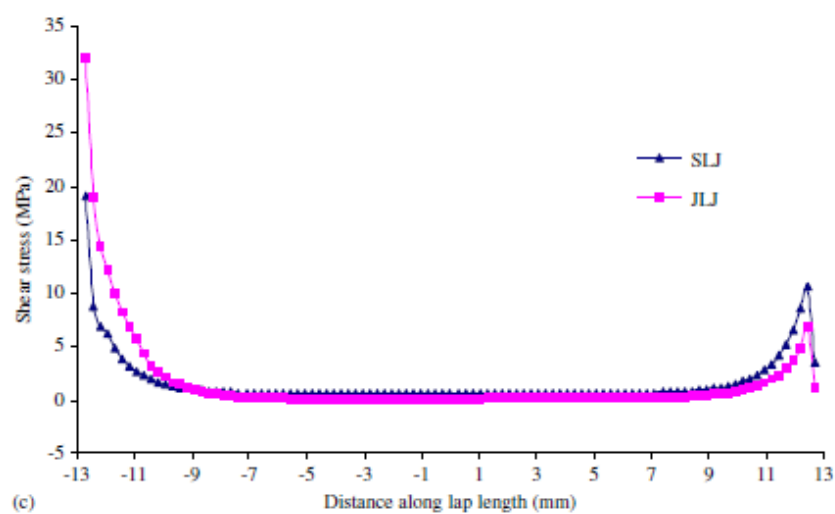


Figura 40- Distribuição de tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição para juntas com ressalto (JLJ) e JSS (SLJ) [29]

Pela análise da Figura 41, verifica-se que a extremidade da ligação do lado da dobragem do aderente é a que está sujeita a maiores tensões e, como tal, é mais provável que seja a partir desta zona que se inicie a rotura da ligação. Este facto pode ser explicado pela curvatura existente no aderente, que provoca uma deflexão lateral na junta [29].

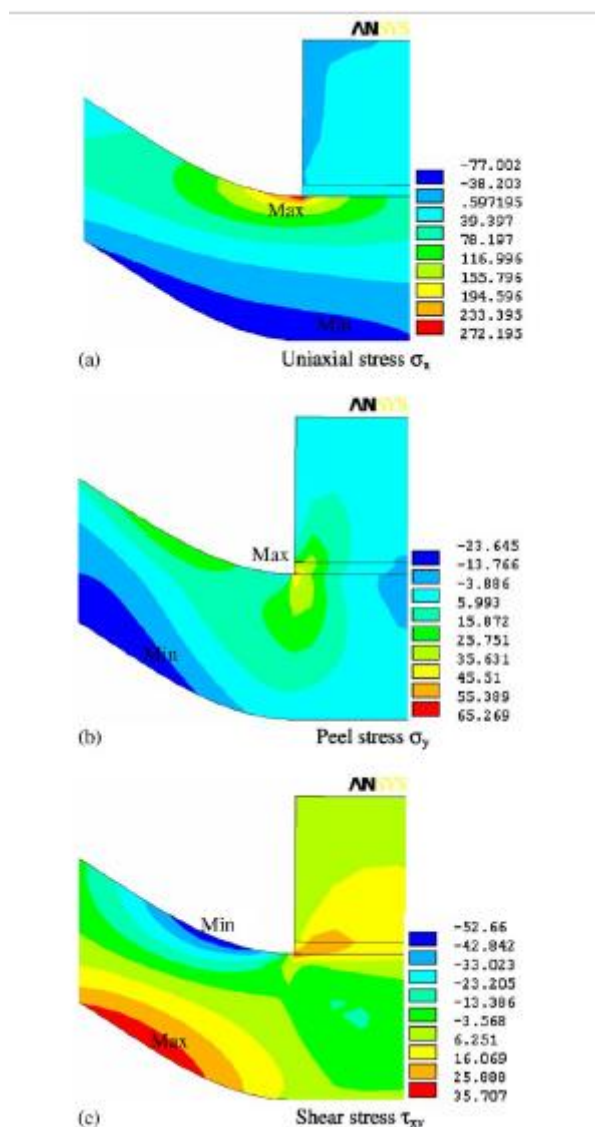


Figura 41 - Tensões na junta de ressalto: a) Tensões uniaxiais; b) Tensões de arrancamento; c) Tensões de corte [29]

2.2.6 Outras alterações geométricas

Uma outra modificação geométrica possível para a resolução do problema do arrancamento existente em JSS é o uso de juntas com os substratos dobradas ou ondulados, mais conhecidos como juntas dobradas. Kishore et al. [57] realizaram uma comparação entre uma JSS normal e uma junta dobrada, com aderentes de compósitos com matriz plástica reforçada a fibras (PRF) (Figura 42).

Os resultados deste estudo demonstraram que a junta com ressalto tem um aumento de resistência na ordem dos 90% em relação à JSS, o que comprova que a redução da excentricidade existente entre os substratos de corte tem de facto influência positiva no que diz respeito à resistência da junta, como demonstram as curvas força-deslocamento apresentadas na Figura 43.

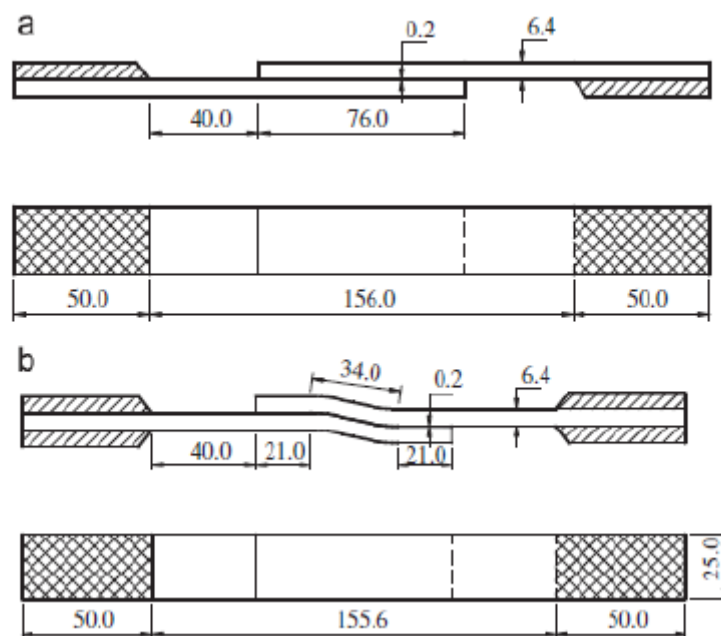


Figura 42 – Esquema de uma JSS (a) e de uma junta de ressalto (b). As dimensões estão em mm [57]

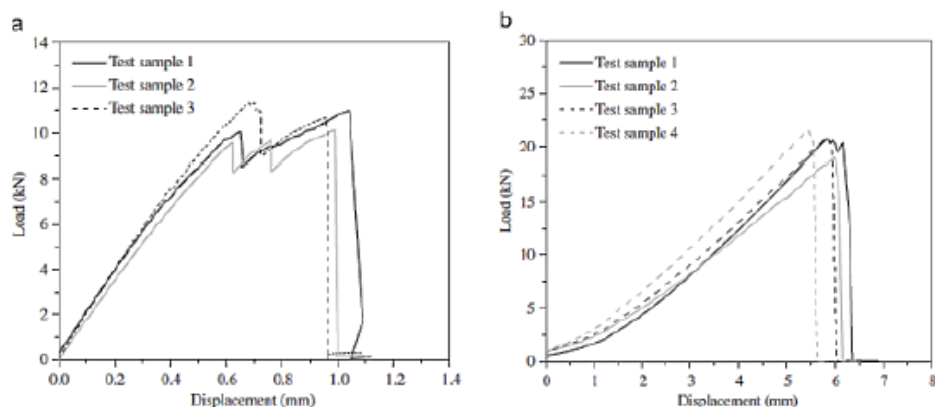


Figura 43 - a) Curvas de força-deslocamento de JSS (a) e juntas de ressalto (b) [53]

Também Campilho et al. [58] procuraram estudar os efeitos de juntas onduladas. O estudo, de natureza experimental e numérica, procurou verificar os resultados da ondulação de JSS com aderentes de alumínio. Neste teste, foram utilizados dois adesivos, o Araldite® AV138, que é um adesivo frágil, e o Araldite®

2015, que é um adesivo dúctil. Os modelos numéricos usados em Abaqus® estão representados na Figura 44.

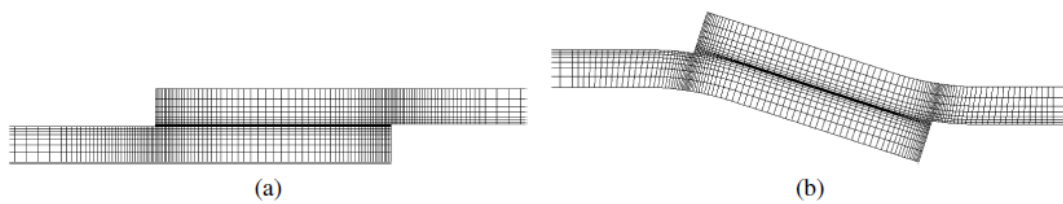


Figura 44 - Modelos numéricos utilizados no estudo: (a) JSS convencional e (b) JSS com dobragem dos aderentes na zona de colagem e sem excentricidade [58]

Verificou-se que a tensão nos aderentes de alumínio era significativamente mais baixa para substratos dobrados. Este resultado é expectável pois, com ao retirar-se a excentricidade pela realização da dobragem, os aderentes de alumínio já não vão estar sujeitos a flexão, pelo que as tensões decrescem. No que diz respeito à distribuição de tensões na zona de colagem, os resultados estão demonstrados na Figura 45. É visível que, quanto menor for a excentricidade (representada pelo parâmetro K) entre os aderentes, mais uniforme é a distribuição de tensões na zona de colagem. De notar que $K=1$ representa uma JSS comum.

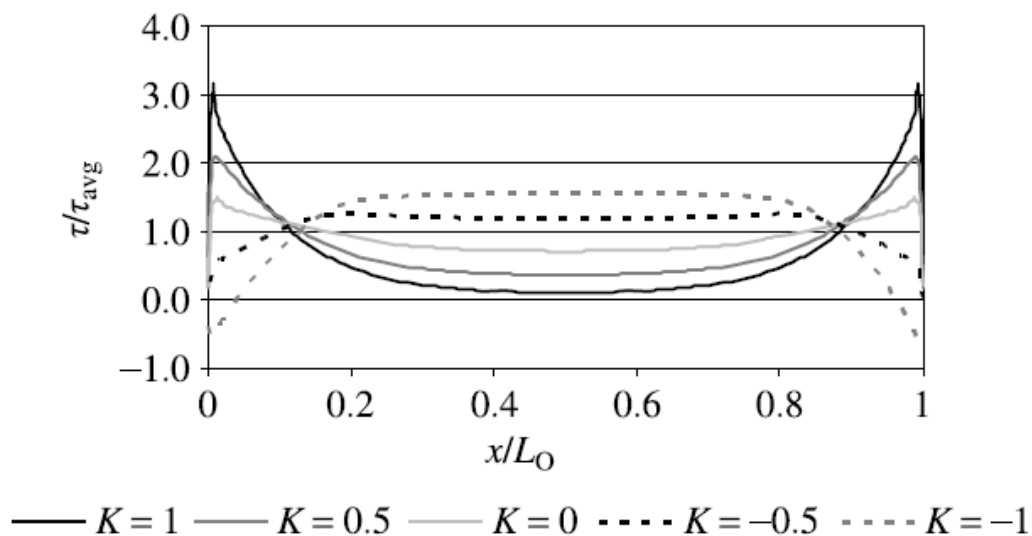


Figura 45 - Distribuição de tensões de corte no adesivo para várias excentricidades. Valores retirados para a espessura média do adesivo [58]

A melhoria do desempenho das juntas é mais significativa se o adesivo em causa for frágil. De facto, o estudo concluiu que o uso de juntas dobradas em juntas com adesivos frágeis teve um aumento de 162% de carga máxima, enquanto em juntas com adesivos dúcteis o aumento foi de apenas 27%. Isto é devido ao facto de os adesivos frágeis não possuírem capacidade de se deformar plasticamente pelo que, ao atingirem a sua carga máxima, entram logo em rotura. Por outro lado, os adesivos

dúcteis a plastificação após atingida a sua tensão de cedência ao invés da rotura imediata, pelo que conseguem aguentar cargas superiores [58].

Uma outra modificação geométrica que se pode fazer numa JSS comum é a criação de um rasgo transversal nos aderentes. A Figura 46 representa o modelo representativo de uma junta com rasgo transversal usado num estudo de elementos finitos realizado por Yan et al. [59]. A investigação considerou o efeito do comprimento e largura de uma ranhura, assim como o módulo de elasticidade do adesivo, na distribuição de tensões no adesivo e nos aderentes.

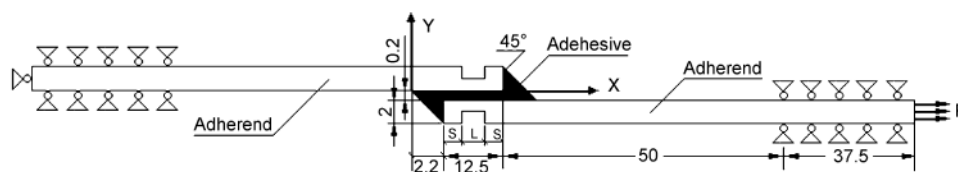


Figura 46 - Modelo de uma junta com rasgo transversal utilizado no estudo de elementos finitos realizado por Yan et al. [59]

Os resultados demonstraram que os picos de tensão no adesivo diminuem consideravelmente com a presença dos rasgos nos aderentes, comparativamente com uma JSS normal. Verifica-se ainda que os valores das tensões registadas na posição correspondente ao rasgo diminuem à medida que se aumenta o comprimento deste, e que o pico de tensões gerado pelo esforço de tração ocorre perto da extremidade da ranhura do aderente. Registou-se ainda um aumento dos valores máximos de tensão com o aumento do módulo de elasticidade. Com estes resultados, o que os autores efetivamente concluíram foi que na presença de um adesivo com baixo módulo de elasticidade, os efeitos dos rasgos transversais, relativamente aos picos de tensão no adesivo, são desprezáveis. No entanto, em adesivos com módulos de elasticidade maiores, os rasgos causam uma diminuição drástica dos picos de tensão [59].

2.2.7 Juntas adesivas com curvatura

Nesta secção irá ser realizado o estado da arte relativo às juntas adesivas com curvatura, já que estas são o objeto de estudo desta dissertação. Esta variante em particular tem ainda muito pouca literatura, dada que o uso destas juntas é ainda muito recente, pelo que este capítulo irá incidir-se essencialmente nos poucos trabalhos feitos em prol das juntas adesivas com curvatura.

2.2.7.1 Considerações gerais

Juntas adesivas com curvatura são basicamente mais uma modificação que se pode realizar em JSS. Neste caso, ambos os substratos são dobrados, de modo a possuírem uma curvatura, tal como mostra a Figura 47.

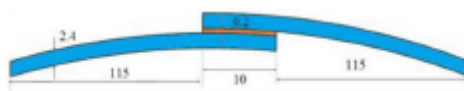


Figura 47 - Ligação adesiva curvada [60]

Este tipo de ligações tem a sua principal aplicação na indústria aeronáutica, mais especificamente na ligação de componentes de material compósito, nomeadamente PRFC. Estas ligações têm sido utilizadas cada vez mais na construção de aeronaves, por causa da sua alta rigidez e alta resistência específica. É aconselhável utilizar-se ligações adesivas para a ligação destes componentes de PRFC, em detrimento das ligações mecânicas, dado que as primeiras são mais fáceis de serem fabricadas, o que permite uma redução do tempo de fabrico e de custo, permitindo também a obtenção de estruturas mais leves [60].

As ligações adesivas com curvatura têm também aplicação bastante difundida na indústria da construção civil, uma vez mais por causa da crescente utilização do PRFC. Até há pouco tempo, a ligação de elementos de PRFC com adesivos estava apenas associada ao reforço de estruturas já existentes de betão armado e de alvenaria. Hoje em dia, o PRFC é o material de escolha para a realização de componentes funcionais de estruturas como coberturas ou pontes. Todas estas estruturas possuem elementos curvos, o que leva à necessidade de utilização de juntas adesivas curvadas [61].

2.2.7.2 Exemplos de trabalhos realizados

Como já visto anteriormente, o uso cada vez mais acentuado de CRFP em aplicações de alto desempenho tem criado a necessidade da utilização de ligações adesivas para a ligação de componentes estruturais deste material. Nas indústrias aeronáutica e construção civil, a utilização de juntas adesivas com curvatura tem sido cada vez mais notória. No entanto, existe pouca bibliografia relativamente ao comportamento deste tipo de juntas, já que a sua utilização é muito recente.

Ascione et al. [61] estudaram a influência da curvatura na resistência da junta e seu comportamento à fratura. Para tal foi realizada uma extensa investigação relativamente às juntas curvadas, relativamente à carga que esta consegue aguentar e o comprimento efetivo de transferência de carga. Foi realizado ainda um estudo de elementos finitos que demonstrou a influência do raio de curvatura na rotura da junta.

Primeiramente, foi realizado um estudo estático de tensões e deformações de uma junta curvada genérica, considerando que o carregamento é axial e aplicado nas extremidades da junta. Os aderentes foram modelados de acordo com as hipóteses de preservação da secção transversal plana e da deformabilidade ao corte. O adesivo é modelado de modo a sofrer um carregamento uniforme ao longo dos eixos n e t , como demonstra a Figura 48.

Para a verificação do comprimento efetivo de transferência de tensão, foi ignorada a influência do R , uma vez que se considera que, no plano da interface da junta, não existe qualquer influência da curvatura na energia libertada durante o colapso. Este comprimento foi calculado considerando o modo II de fratura, e a equação (1) representa a fórmula final para o cálculo do comprimento efetivo de transferência de tensão

$$L_{\text{eff}} = L^* + \frac{\pi}{\omega}, \text{ onde}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{a \times \alpha_{\text{II}} \times b_{\text{a}}}{E^{(2)} \times A^{(2)}}}, \quad a = 1 + \frac{1}{\lambda} \quad \text{e} \quad \lambda = \frac{E^{(1)} \times A^{(1)}}{E^{(2)} \times A^{(2)}}, \quad (1)$$

em que L^* representa o comprimento da zona coesiva. O parâmetro α caracteriza o tipo de junta ($\alpha=2$ para juntas simétricas e $\alpha<2$ para juntas não simétricas), α_{II} representa a rigidez do ramo elástico para o modo II de fratura, b_a representa a largura da camada adesiva e λ é um parâmetro que representa a influência do módulo de elasticidade e da área de cada um dos aderentes. Os índices (1) e (2) referem-se a cada um dos aderentes [61].

Parida et al. [62] usaram o MEF para estudar os efeitos de R e de delaminações pré-existentes em 3 modos diferentes de taxa de libertação de energia (G_I , G_{II} e G_{III}) em JSS curvas com aderentes de PRF. A configuração geométrica desta junta está apresentada na Figura 50. De notar que, para além da existência de uma camada de adesivo a ligar os dois substratos, existe uma aplicação prévia de um outro adesivo (“*strap adherent*”) nas superfícies de cada um dos substratos, de modo a melhorar otimizar o processo de ligação.

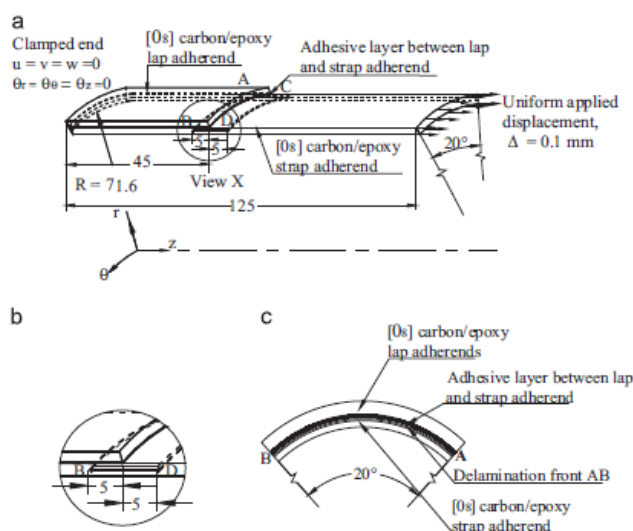


Figura 50 - Junta de sobreposição simples com delaminação interfacial com comprimento de 10 mm entre a primeira e a segunda camada de "*strap adherent*": a) Configuração geométrica da junta de sobreposição simples e respetiva carga; b) Vista aumentada que pretende dar realce à delaminação; c) Vista em corte de 2 dimensões que demonstra a delaminação entre os pontos A e B [62]

O *software* de elementos finitos utilizado para a modelação desta junta foi o ANSYS 14.5 *Parametric Design Language* (APDL). A modelação da junta curvada, com os seus respetivos aderentes e adesivo, foi realizada com o elemento finito com a designação SOLID 185. No que diz respeito à malha, esta é mais densa na zona da delaminação, de modo a assegurar a convergência da solução obtida, como indicado por Tay et al. [63] e Raju et al. [64]. Na Figura 51 está representada a zona de sobreposição da junta e respetiva malha.

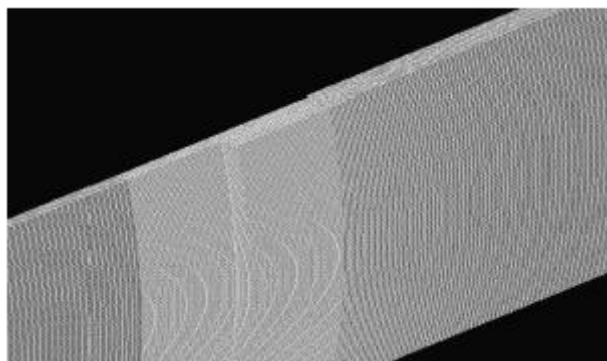


Figura 51 - Representação da região de sobreposição e respetiva densidade de malha [62]

Para verificar a influência de R , foram testadas 6 juntas curvadas com diferentes raios, mas tendo todas L_0 de 25 mm, como demonstra a Figura 52. À medida que o raio vai diminuindo entre as juntas, o ângulo formado pela curvatura das juntas vai aumentando, de modo a manter o comprimento das ligações adesiva em 25 mm [62].

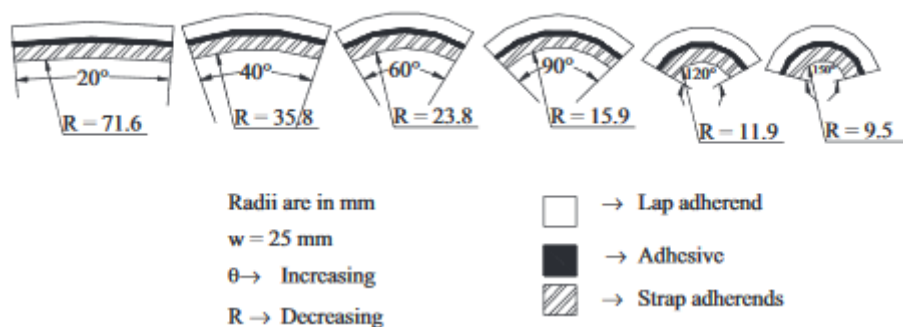


Figura 52 - Vista em corte das juntas curvadas testadas [62]

Constatou-se que o valor de energia libertada por cada um dos 3 modos em causa é superior, quanto maior é o ângulo de curvatura da junta, ou seja, para o mesmo L_0 , à medida que o R vai aumentando de provete para provete, a energia libertada diminui. Por outro lado, tendo em conta a existência da delaminação inicial, constatou-se que as juntas curvadas têm menor resistência ao dano causado por este fator que das juntas lisas. Também se concluiu que a magnitude e natureza das tensões interlaminares entre as extremidades da junta e a zona interior da

sobreposição são significativamente diferentes, o que mostra que existem efeitos de bordo nas juntas [62].

Liu et al. [60] estudaram o efeito do tamanho, da curvatura e das extremidades livres na resistência de juntas adesivas com aderentes de material compósito, com recurso a análise por elementos finitos em conjunto com o MDC. A Figura 53 representa as juntas estudadas, sendo que no centro se apresenta uma junta curvada, com algumas características adicionais, cada uma destas representadas pelas configurações (a) até (d), estudadas em separado.

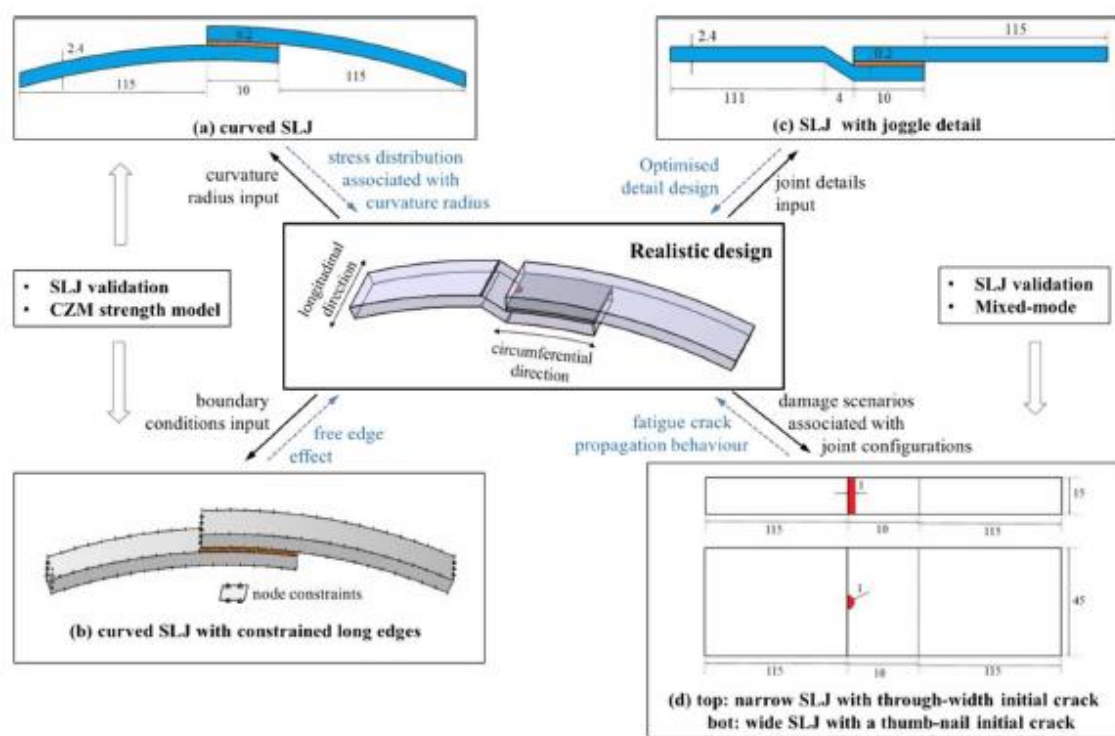


Figura 53 - Configurações estudadas: no centro, tem-se uma junta curvada com ressalto, com dano inicial e com as extremidades constrangidas; (a) junta curvada; (b) junta curvada com as extremidades constrangidas; (c) junta com ressalto; (d) duas juntas, uma com largura de 15 mm e outra com largura de 45 mm com diferentes cenários de dano inicial [60]

Para estudar o efeito da curvatura, R tomou os valores de 1000, 2000 e 3000 mm. O modelo de Abaqus® que pretende representar esta situação está representada na Figura 54. Os aderentes são constituídos por 16 camadas de fibra de carbono impregnada com resina epóxida, enquanto o adesivo considerado é o Araldite® 2015, um adesivo dúctil que permite grandes deformações plásticas.

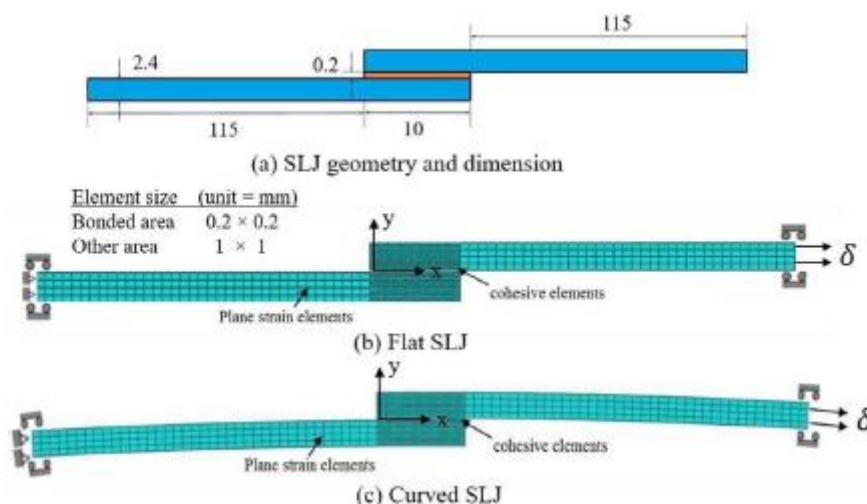


Figura 54 – Geometria das juntas: (a) geometria de base de uma JSS; (b) modelo de elementos finitos da junta (a); (c) junta curvada realizada a partir da junta (a) [60]

Os aderentes foram modelados como sendo materiais elásticos ortotrópicos, com as respectivas orientações especificadas no modelo de elementos finitos da junta, e o adesivo como sendo um material isotrópico. Para assegurar a estabilidade numérica dos elementos coesivos, foi realizado um estudo de convergência de malha, sendo que a malha resultante tinha elementos quadrados de lado 0,2 mm na zona da sobreposição. Para as restantes zonas do modelo, foram utilizados elementos quadrados de lado 1 mm, de modo a melhorar o tempo de computação.

Com a realização deste estudo, verificou-se que a curvatura tem um efeito desprezável na carga máxima que a junta consegue aguentar, a partir de um raio de 2000 mm. Verificou-se também que a consideração de arestas livres no estudo de elementos finitos constitui uma alternativa numérica conservadora para a análise da resistência de juntas com as arestas restringidas. Relativamente ao ressalto, verifica-se que, com a adição deste elemento, registam-se menores tensões de arrancamento e uma fenda menor na parte final côncava da zona de colagem da junta adesiva. No entanto, se a fenda iniciar pela parte convexa da zona de sobreposição da junta, esta tem maior comprimento e maiores tensões de arrancamento, ou seja, verifica-se que a zona convexa é o local mais crítico de uma junta de sobreposição curvada. Com o ressalto, a junta é mais suscetível à rotura pelo adesivo quando comparada com JSS [60].

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais

pesadas. Esta realidade estava relacionada com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados, que se faziam notar há algumas décadas. As duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [65], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [66] é a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris and Adams [67], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [68]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas, o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.3.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações

adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [65], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [69] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidades de tensão nas extremidades do L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [70]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris and Adams [67], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, este ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.3.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que as estruturas e os seus materiais são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se as fendas são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, estas se mantêm com dimensões inferiores às críticas, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fendas pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [71]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [72] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da

iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [73]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [74] e por Rice [75] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [76], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solicitação.

2.3.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com os estudos de Barenblatt [77] e Dugdale [78], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caraterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita por elementos de mola ou, mais convencionalmente, por elementos coesivos [79].

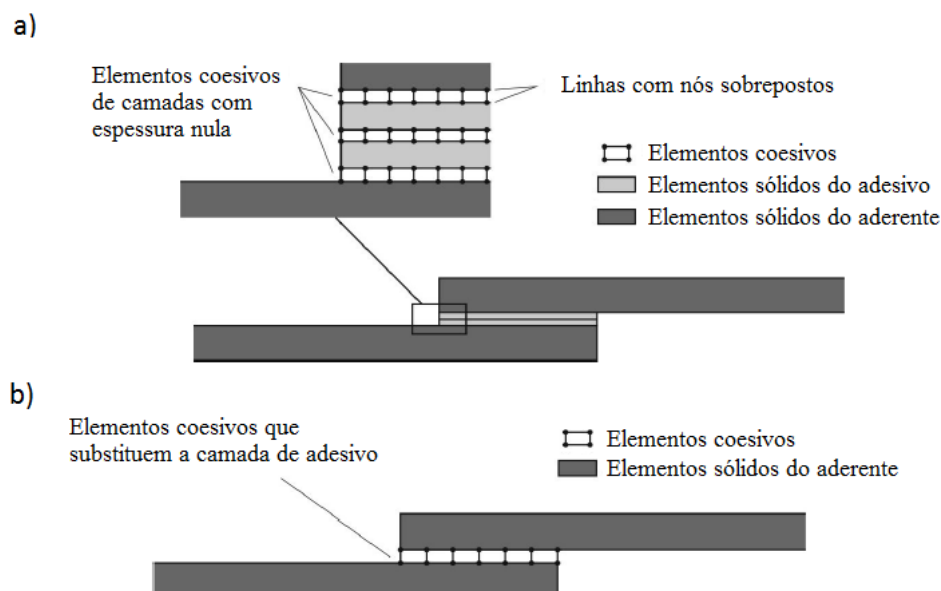


Figura 55 - Elementos coesivos para simular uma camada de adesivo: aproximação local (a) e aproximação contínua (b) (adaptado de [80])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [81]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 55), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [82], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [83].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenômenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação de leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e consequentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [84]. Este modelo está implementado em *software*, como é o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [85].

2.3.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [86], triangular [87], exponencial [88], polinomial [89] e trapezoidal [83]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [90].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [91]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [92] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 56).

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto

é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [93].

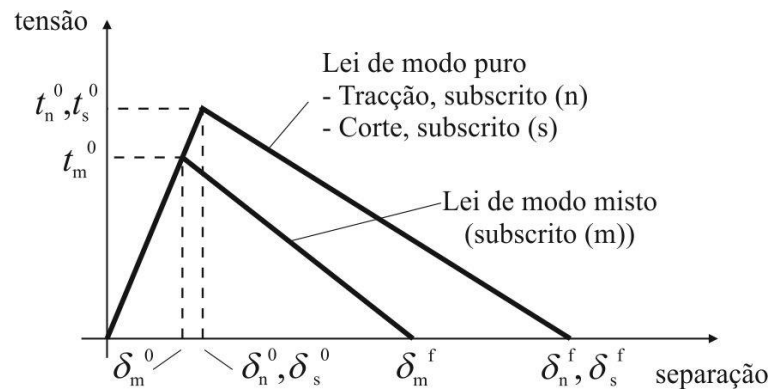


Figura 56 - Modelo coesivo triangular [92, 94]

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [95] e modo II [96].

2.3.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville and Ladevèze [97] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [98] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [79].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [99]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [100] ou do número de ciclos para análises de fadiga [101, 102]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o

caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [103].

Hua et al. [104] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas sujeitas a degradação ambiental e ligadas com um adesivo dúctil. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente. Desta forma, obtiveram-se resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [105] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média, para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.3.5 Método de Elementos Finitos Extendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [106]. Belytschko and Black [107], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseado no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [108]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da

estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona as tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [109].

Campilho et al. [110] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 57). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

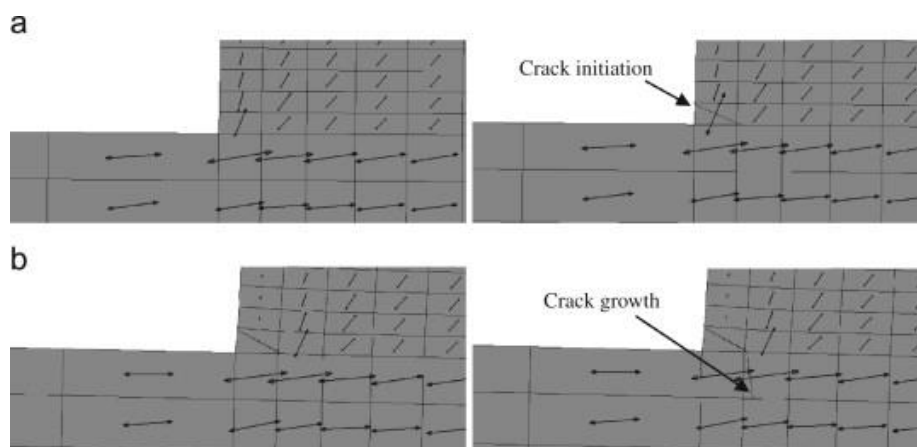


Figura 57 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [110]

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo é dividido em 2 partes distintas. No subcapítulo 3.1 têm-se numa primeira parte a apresentação da metodologia usada para a execução dos estudos numéricos realizados em Abaqus®. O que é de facto relevante, ainda no subcapítulo 3.1 é a demonstração da aplicabilidade dos modelos numéricos para previsão da resistência de ligações adesivas. Para tal foram comparados dados numéricos e experimentais pré-existentes, relativos à resistência de JSS com os adesivos Araldite® 2015, Araldite® AV138 e Sikaforce® 7888. Ao confirmar a precisão dos resultados obtidos por via numérica para JSS, pode-se de forma análoga usar MEF para a previsão da resistência de juntas com curvatura.

Após a validação do método em causa, no subcapítulo 3.2 são apresentados e discutidos criticamente os resultados numéricos obtidos para os testes numéricos realizados em juntas curvadas, nomeadamente a nível de resistência, energia dissipada, dano e tensões.

3.1 Técnica numérica para previsão da resistência

O objetivo principal desta secção é a confirmação de que o método numérico e respetiva lei coesiva a ser utilizada são de facto aplicáveis ao estudo de JSS, através de uma comparação com dois estudos experimentais já realizados, um que contém dados relativos aos adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7888 [111] e outro que contém os dados relativos aos adesivos Araldite® 2015 [112]. A relevância deste estudo comparativo é que ao ser possível afirmar que os métodos numéricos implementados traduzem com fiabilidade o comportamento de JSS, podemos admitir que podem ser utilizados para o estudo de juntas curvadas. Apresenta-se também a caracterização do estudo do estudo numérico realizado e da experiência real que foi feita, a nível de materiais utilizados, processo de fabrico dos provetes a serem testados, assim como uma breve descrição do ensaio de tração.

3.1.1 Condições da análise numérica

O software utilizado para a realização da análise numérica foi o Abaqus®. Este efetivamente permite a utilização de MDC para a previsão da resistência de todo o tipo de ligações adesivas. Para o caso das juntas curvadas foram realizadas análise a nível da resistência e a nível das tensões internas.

O primeiro passo consistiu no desenho da junta. Na Figura 58 apresenta-se o desenho exterior realizado de uma das juntas curvadas que foi testada com o auxílio do referido programa.



Figura 58 - Geometria da junta curvada criada em Abaqus® para o caso particular em que a espessura dos aderentes é de 1,2 mm e o comprimento de sobreposição é 10 mm

De notar, que as juntas testadas apresentam um valor de t_a de 0,2 mm e um comprimento total de junta (L_t) fixo em 200 mm. Os valores que variam são o L_o (testou-se 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 mm), t_p (testou-se 1,2, 2,4 e 3,6 mm) e R (testou-se 1000, 2000 e 3000 mm).

Os substratos foram modelados com elementos sólidos homogêneos e o adesivo com elementos coesivos, como mostra a Figura 59.

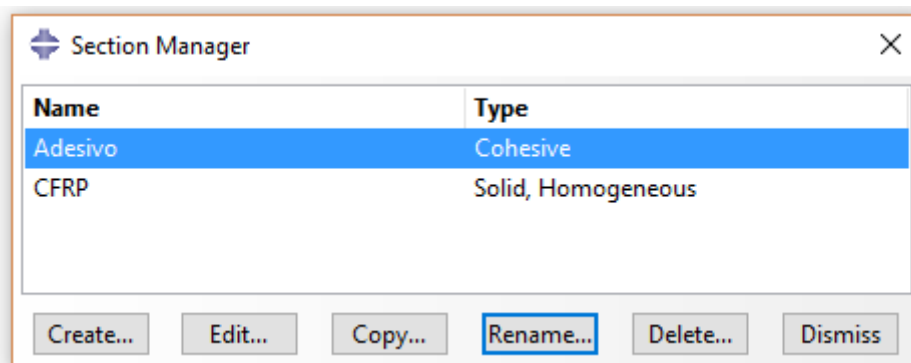


Figura 59 - Definição do tipo de elementos para o substrato e adesivo da junta realizado em Abaqus®

Também foi necessário introduzir as propriedades mecânicas dos materiais em estudo, para estes serem definidos no Abaqus®. Os valores usados para a definição do material do substrato e dos adesivos são discutidos com mais pormenor no subcapítulo 3.1.3.2

A Figura 60 representa a carga simulada no *software* à qual a junta curvada estará sujeita. Verifica-se que esta encontra-se encastrada na extremidade da esquerda, enquanto que no lado oposto temos um carregamento de tração. De notar que a direção da força aplicada não é completamente horizontal, mas sim, a mais aproximada possível ao eixo de curvatura do substrato. O pormenor da Figura 60, é uma vista aproximada da extremidade direita da junta, onde se coloca a carga a ser aplicada. A fim de ser possível dar o correto sentido da força de tração em Abaqus®, foi necessário criar uma extensão de comprimento desprezável da junta, que serviu de auxílio à criação de um eixo aproximado à curvatura do substrato. De notar que os deslocamentos a serem aplicados para a realização dos testes variam conforme o valor de L_o , t_p e o adesivo utilizado. A maioria dos testes foram feitos para um deslocamento

de 1mm mas, em alguns, este valor não foi suficiente para a rotura da junta, pelo que alguns testes foram analisados para um deslocamento aplicado de 3 mm.

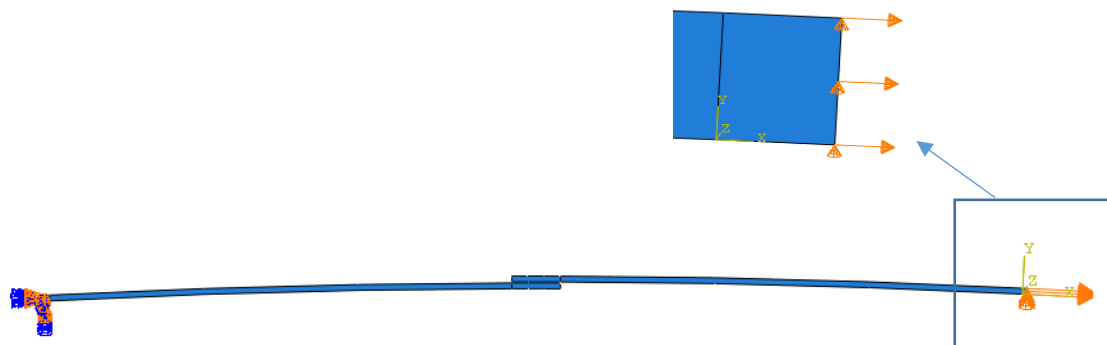


Figura 60 - Representação das condições de carregamento simuladas em Abaqus®, com pormenor na extremidade, onde se coloca a força de tração

O último passo antes da realização do estudo propriamente dito consiste na formulação da malha da junta curvada. As malhas para o modelo de análise de tensões são extremamente refinadas, de modo a ser possível obter com alguma precisão os picos de tensão nas extremidades da zona de sobreposição. Tal precisão não é necessária para uma análise de resistência pelo que as malhas relativas a estudo são mais grosseiras, com cada elemento desta a ter um comprimento 10 vezes superior aos elementos das malhas para análise de tensões. De seguida, descrevem-se as malhas usadas para o estudo da resistência do adesivo.

Na zona superior e inferior da sobreposição da junta, os elementos da malha têm no centro um comprimento máximo de 0,5 mm, enquanto que nas extremidades tem um comprimento mínimo de 0,2 mm. Com a configuração de *double-bias*, consegue-se garantir uma maior refinação da malha nas 2 extremidades da sobreposição dos substratos, que são as zonas da ligação onde as tensões são mais elevadas, como se verifica pela análise da Figura 61.

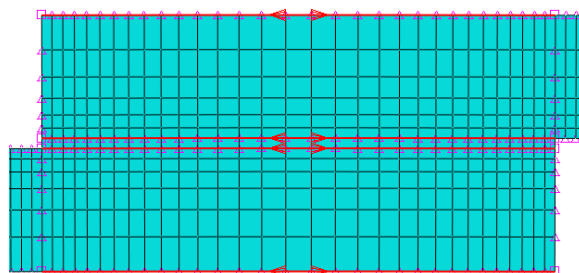


Figura 61 - Representação da refinação da malha e sentido do *bias* necessário para a zona de sobreposição

Na zona em que os substratos não se encontram em contacto com o adesivo, a malha foi definida para ficar cada vez mais refinada nas proximidades do adesivo, como se verifica na Figura 62. Para tal, foi definido um comprimento máximo do elemento de 2 mm e um comprimento mínimo do elemento de 0,2 mm.

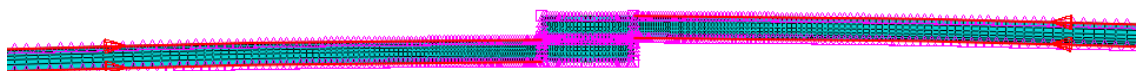


Figura 62 - Representação da refinação da malha e sentido do *bias* necessário para a zona em que os substratos não se encontram em contacto com o adesivo

Foi também necessário aplicar um refinamento crescente da malha nas proximidades do adesivo ao longo da espessura do substrato (Figura 63).

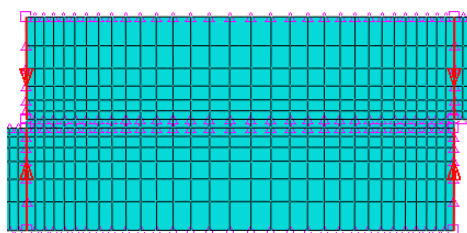


Figura 63 - Representação da refinação da malha e sentido do *bias* definido ao longo da espessura dos substratos

O comprimento dos elementos da malha representada na Figura 63, está definido na Tabela 3. É de se lembrar que estão a ser estudadas 3 valores diferentes de t_p e como tal, foram definidos comprimentos de elementos de malha diferentes para cada caso a fim de se evitar malhas demasiado refinadas nas zonas mais longínquas do adesivo.

Tabela 3 - Comprimentos máximo e mínimo para os elementos da malha, dependendo da espessura do substrato a ser testada

| t_p | 1,2 | 2,4 | 3,6 |
|--------------------------------|--------|---------|------|
| Comprimento máximo do elemento | 0,5 mm | 0,75 mm | 1 mm |
| Comprimento mínimo do elemento | 0,2 mm | | |

Para a camada de adesivo, a malha definida contém apenas um elemento de comprimento 0,2 mm, não sendo para este caso necessário definir qualquer *bias* (Figura 64).

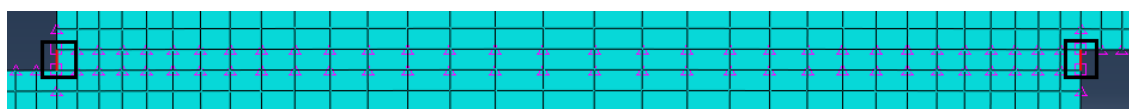


Figura 64 - Malha formada para representar a camada de adesivo

Pretende-se usar malhas mais grosseiras nos casos em que tal é possível, pois estas, com menor número de elementos quando comparadas às que têm maior refinação permitem que os testes sejam realizados de forma mais rápida (quanto

maior o número de elementos da malha, mais tempo demora o computador a efetuar a análise numérica), obtendo resultados fiáveis e precisos.

A definição do tipo de malha e da forma dos elementos da malha, foi feita no comando *mesh control* do Abaqus®. A Figura 65 representa a definição destes parâmetros no *software* para a camada de adesivo, no qual foi definido que a malha é do tipo *sweep* em que os elementos desta teriam forma de quadrilátero.

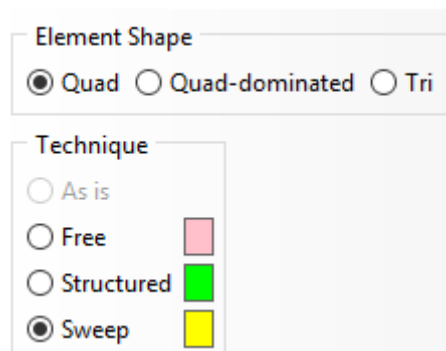


Figura 65 - Definição do tipo de malha e forma dos elementos da malha para a camada de adesivo

A Figura 66 representa a definição dos mesmos parâmetros, mas para as secções da junta que representam o substrato, no qual foi definido que a malha é do tipo *structured* em que os elementos desta teriam forma quadrangular.

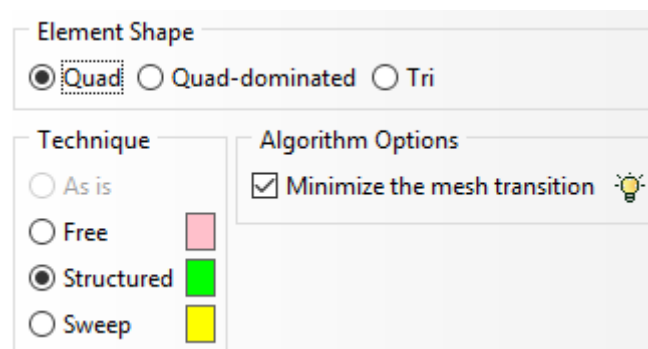


Figura 66 – Definição do tipo de malha e forma dos elementos da malha para as secções dos substratos

A definição do tipo de elemento foi realizada no comando *Assign Element Type* do Abaqus®. A Figura 67 representa a interface na qual se definiu que o tipo de elemento da camada de adesivo seria coesivo.

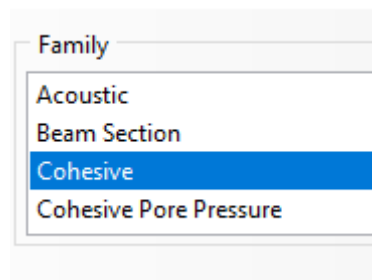


Figura 67 - Tipo de elemento definido para o material constituinte da camada de adesivo

A Figura 68 representa a interface na qual se definiu que o tipo de elemento das secções que representam o substrato seriam de *plain strain* (estado plano de deformação).

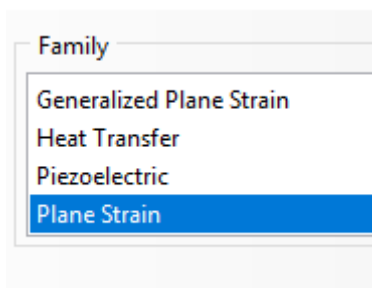


Figura 68 - Tipo de elemento definido para o material constituinte das secções representativas dos substratos

3.1.2 Modelo de dano coesivo

Existem diferentes variedades de MDC a serem aplicados em diferentes situações, consoante o comportamento dos materiais em causa ou das interfaces a serem simuladas [90] tais como a triangular [87], a linear parabólica [86], a exponencial [88], a polinomial [89] ou a trapezoidal [83]. Entre estas, a lei triangular é a mais popular devido à sua maior simplicidade, quando comparada com as outras, pois permite a obtenção de resultados precisos para a maioria dos casos reais para um menor número de parâmetros a serem determinados [91]. O modelo triangular implementado no Abaqus® está representado na Figura 56, no qual têm-se a representação da lei pura e da lei mista.

A lei pura é caracterizada pelo facto de a propagação do dano ocorrer num conjunto específicos de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na respetiva lei coesiva. Na lei mista temos a utilização de critérios de tensão e de energia para ser possível combinar esforços de tensão e de corte [93]. Neste caso, os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação e uma relativa à deformação de corte, sendo estas determinadas por via de uma análise cinemática do elemento. De notar que em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezáveis.

Antes da existência de dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_{COH} \cdot \varepsilon \quad (0.2)$$

A matriz contém a rigidez da ligação adesiva, cujo valor é função da formulação utilizada. Mais concretamente, no caso de uma formulação local, usada para simulação de fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores muito elevados, a fim de não existirem deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [113]. Para o caso de uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, têm-se uma aproximação fiável aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 \quad (0.3)$$

em que E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Assim, ao considerar estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [93]. Em modo misto, a iniciação pode ser definida por diferentes critérios, tal como o critério quadrático de tensões, definido pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (0.4)$$

onde $\langle \rangle$ são os parênteses de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. Este critério é distinguido pela sua precisão, como indicado em trabalhos anteriores [114]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 56), pela expressão da equação 1.4, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de homólogos (Figura 56) é prevista por um critério linear energético, em função de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (0.5)$$

3.1.3 Validação da técnica numérica

Para ser possível a realização dos testes numéricos em causa, foi primeiro necessário verificar se o método numérico baseado em MDC é de facto aplicável para esta situação. Para tal, foi realizada uma comparação entre dados numéricos e experimentais, já existentes, relativamente à resistência de uma JSS com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888.

3.1.3.1 Geometria da junta

A Figura 69 representa a configuração geométrica e respectivas dimensões de uma JSS e de uma junta curvada. Os parâmetros geométricos realçados são o L_t , o t_p , o t_a , o L_o e o R . Para as juntas curvadas, o estudo paramétrico efetuado foi realizado para L_o de 10 mm até 80 mm, com intervalos de 10 mm, t_p de 1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm e R de 1000, 2000 e 3000 mm. Os valores considerados para t_a e L_t são respetivamente 0,2 mm e 200 mm e são fixos para todos os testes realizados. Relativamente às JSS criadas para a validação do método numérico, o valor de L_o varia entre 10 mm e 80 mm, também com intervalos 10 mm, t_a , L_t e t_p tomam respetivamente os valores de 0,2 mm, 25 mm e 3 mm, sendo estes 3 últimos parâmetros fixos em todos os testes. De notar que, para cada L_o , foram testados 5 provetes.

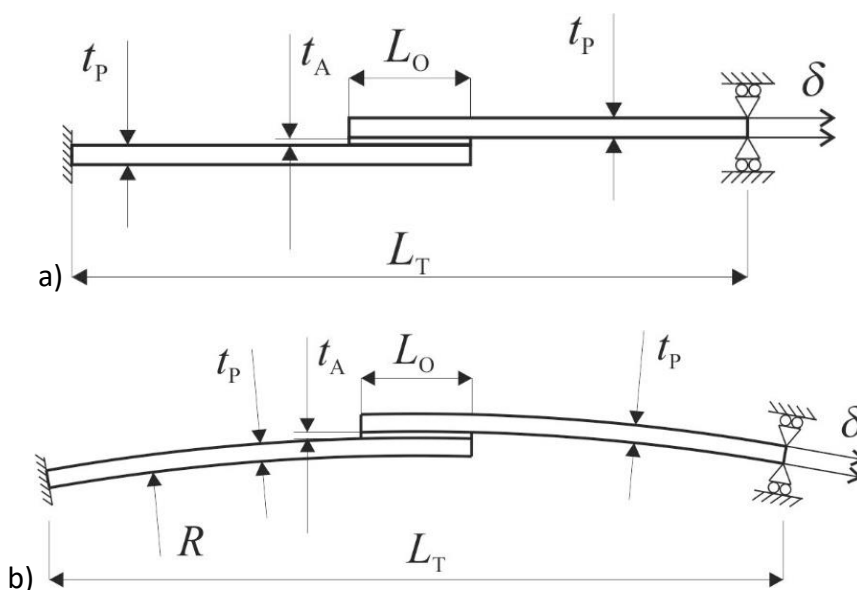


Figura 69 - Esboço das juntas e respectivas dimensões: (a) JSS convencional e (b) junta curvada

3.1.3.2 Materiais utilizados

Para a realização do estudo numérico e respetiva validação foram usados 3 adesivos diferentes, o Araldite® 2015, o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7888. O PRFC é o material usado para os substratos.

3.1.3.2.1 Substratos

O substrato da ligação adesivo é constituído por um compósito de matriz de resina epóxida com reforço de fibra de carbono unidirecional, que lhe confere resistência e rigidez elevada. O PRFC usado foi obtido a partir do pré-impregnado da SEAL® Texipreg HS 160 RM, considerado um material de excelência em diversas aplicações de alto desempenho como a indústria aeronáutica, onde o fator mais determinante é a resistência e rigidez específica. As propriedades elásticas

ortotrópicas do PRFC foram obtidas em estudos anteriores [113] e estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades dos substratos constituídos por PRFC [113]

| E_1 [MPa] | E_2 [MPa] | E_3 [MPa] | ν_{12} | ν_{13} | ν_{23} | G_{12} [MPa] | G_{13} [MPa] | G_{23} [MPa] |
|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| 109000 | 8819 | 8819 | 0.342 | 0.342 | 0.38 | 4315 | 4315 | 3200 |

3.1.3.2.2 Adesivos

Para esta dissertação foram comparados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888.

O Araldite® AV138 com o endurecedor HV 998 é um sistema epóxico bi-componente que, quando combinado, apresenta uma excelente resistência química e mecânica. Este é um adesivo frágil. A combinação dos componentes resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/40 g, respetivamente. A aplicação deste adesivo é feita de forma manual com recurso ao uso de uma espátula.

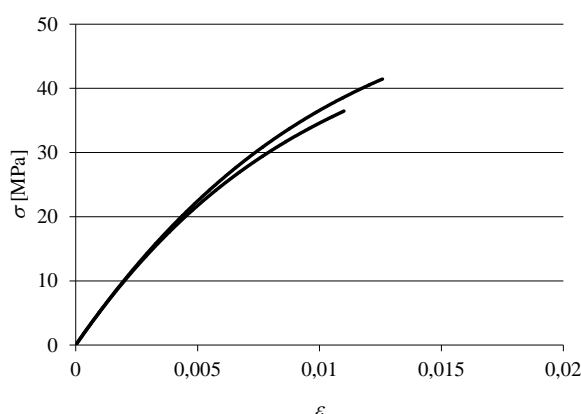


Figura 70 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [115]

As curvas σ - ε dos provetes maciços ensaiados à tração são apresentadas na Figura 70. Estas curvas foram obtidas experimentalmente [115]. As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo são descritas na Tabela 5.

O Araldite® 2015 é um adesivo epóxico estrutural bi-componente de ductilidade moderada. Este adesivo, comparado com o Araldite® AV138, oferece resistências à tração e ao corte inferiores. Contudo, por ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas extremidades das juntas [115]. O Araldite® 2015 é fornecido em cartuchos, possui dois componentes, e a sua cura é efetuada à temperatura ambiente. A sua razão de aplicação é de 50 g/50 g, sendo a mistura realizada por um bico e aplicado por meio de uma pistola de aplicação.

Tabela 5 - Propriedades do Araldite® AV138 [116]

| Propriedades | Valor |
|--|-------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | 4,89±0,81 |
| Coeficiente de Poisson, ν | 0,35 ^a |
| Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa] | 36,49±2,47 |
| Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa] | 39,45±3,18 |
| Deformação de rotura à tração, ε_f [%] | 1,21±0,10 |
| Módulo de elasticidade transversal, G [GPa] | 1,56±0,01 |
| Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa] | 25,1±0,33 |
| Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa] | 30,2±0,40 |
| Deformação de rotura ao corte, γ_f [%] | 7,8±0,7 |
| Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm] | 0,20 ^b |
| Tenacidade ao corte, G_{IIIC} [N/mm] | 0,38 ^b |

^a Valor do fabricante.

^b Valores estimados na referência [111].

Na Figura 71 são apresentadas as curvas σ - ε dos provetes maciços ensaiados à tração [115]. Os valores das principais propriedades mecânicas e de fratura deste adesivo são apresentados na Tabela 6. Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tração do Araldite® AV138 é praticamente o dobro do Araldite® 2015.

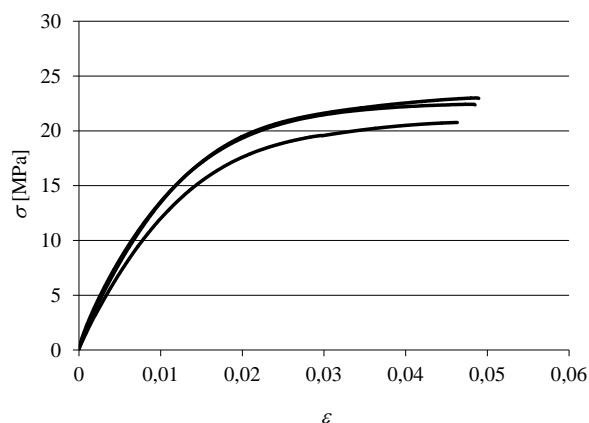
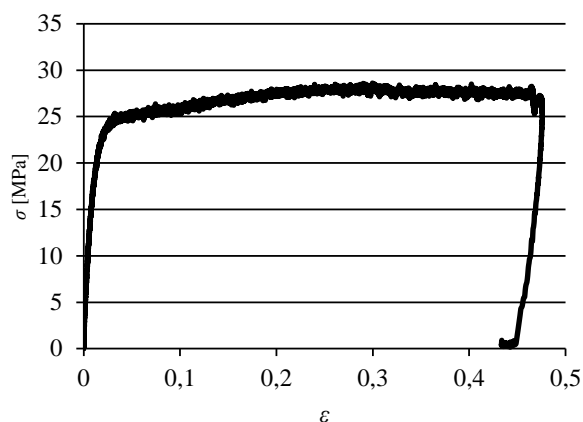
Figura 71 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [115]

Tabela 6 - Propriedades do Araldite® 2015 [115]

| Propriedades | Valor |
|--|-------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | 1,85±0,21 |
| Coeficiente de Poisson, ν | 0,33 ^a |
| Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa] | 12,63±0,61 |
| Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa] | 21,63±1,61 |
| Deformação de rotura à tração, ε_f [%] | 4,77±0,15 |
| Módulo de elasticidade transversal, G [GPa] | 0,56±0,21 |
| Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa] | 14,6±1,3 |
| Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa] | 17,9±1,8 |
| Deformação de rotura ao corte, γ_f [%] | 43,9±3,4 |
| Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm] | 0,43±0,02 |
| Tenacidade ao corte, G_{IIIC} [N/mm] | 4,70±0,34 |

^a Valor do fabricante.

O Sikaforce® 7888 é um adesivo estrutural de base poliuretano de alta resistência e ductilidade. Este adesivo é composto por dois componentes, e a sua cura é feita à temperatura ambiente. Este adesivo é aplicado recorrendo ao uso de uma pistola pneumática. É o mais dútil dos três adesivos utilizados e é particularmente aplicado na indústria automóvel [117]. Este adesivo faz parte de uma nova geração de adesivos que combinam a elevada resistência dos epóxidos com a capacidade de deformação dos elastómeros. Apresenta uma elevada resistência e capacidade de alongamento, e ainda uma elevada resistência a esforços dinâmicos, o que beneficia a sua resistência à fadiga [118]. Na Figura 72 é apresentada uma curva σ - ε representativa de ensaio de provetes maciços para este adesivo [111].

Figura 72 - Curva σ - ε de um provete maciço do adesivo Sikaforce® 7888 [111]

Os valores das principais propriedades deste adesivo estão presentes na Tabela 7 [111]

Tabela 7 - Propriedades do Sikaforce®7888 [115]

| Propriedades | Valor |
|---|--------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | 1,89±0,81 |
| Coeficiente de Poisson, ν | 0,33 ^a |
| Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa] | 13,20±4,83 |
| Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa] | 28,60±2,0 |
| Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%] | 43,0±0,6 |
| Módulo de elasticidade transversal, G [GPa] | 0,727 ^b |
| Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa] | - |
| Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa] | 20 ^a |
| Deformação de rotura ao corte, γ_f [%] | 100 ^a |
| Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm] | 1,18±0,22 |
| Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm] | 8,72±1,22 |

^a Valor do fabricante.
^b Valor estimado pela Lei de Hooke.

3.1.3.3 Processo de fabrico

Os provetes de compósito necessários para a criação das juntas adesivas experimentais foram obtidos a partir de uma placa de compósito de matriz epóxida reforçada com o pré impregnado unidireccional da SEAL® (Texipreg HS160 RM). Após corte das placas, estas foram posteriormente colocadas numa prensa de pratos quentes para a realização do processo de cura. O ciclo térmico a que estas foram submetidas está representado na Figura 73 e consiste num aquecimento inicial das placas até 130°C, após o qual se seguiu um período de 1 hora a temperatura constante e pressão de 4 bar. Passado esse tempo inicia-se um processo de arrefecimento em que se coloca prensa a uma temperatura de 20°C até as placas atingirem uma temperatura de 60°C. De 15 em 15 minutos abriu-se por uns segundos a água para ajudar ao arrefecimento da placa. Assim que a placa atingisse 60°C retirou-se esta do interior da prensa e deixou-se arrefecer ao ar até atingir a temperatura ambiente [111].

Procedeu-se ao corte das placas de compósito de modo a estas terem as dimensões pretendidas para os provetes. A Figura 74 representa uma imagem do corte de uma das placas numa máquina que possui um disco de corte com revestimento de diamante refrigerada a água e uma mesa deslizante. Para garantir que os provetes ficavam com a mesma espessura colocou-se um calço para servir de apoio [111].

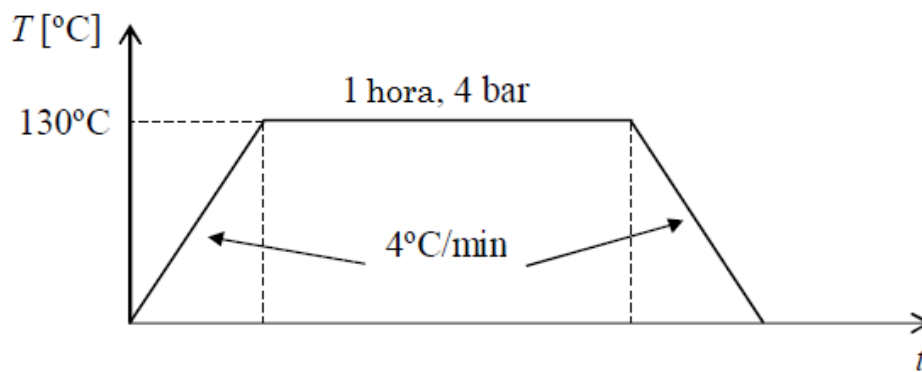


Figura 73 - Ciclo térmico para cura das placas de pré-impregnado [111]



Figura 74 - Pormenor do corte da placa de compósito [111]

Após o corte, as placas receberam um tratamento de lixamento para a eliminação de fibras soltas. Nesta altura pode-se realizar a colagem dos provetes para a formulação da junta, com o auxílio dos adesivos a serem testados. A cura dos provetes é feita à temperatura ambiente durante uma semana e antes da realização dos ensaios é necessária uma limpeza dos eventuais filetes no adesivo com recurso a uma furadora [111].

3.1.3.4 Ensaio das juntas

Para a determinação da resistência de juntas adesivas, o ensaio a ser feito é o de tração. A máquina representada na Figura 75 é da marca Shimadzu, munida com uma célula de carga de 100 kN, e capaz de realizar uma variedade de ensaios entre os quais o de tração. Este foi feito a uma velocidade de 1 mm/min, à temperatura ambiente e para cada comprimento de sobreposição foram testados 5 provetes [111].



Figura 75 - Máquina Ensaios Universal SHIMADZU [111]

3.1.3.5 Resultados obtidos

Com os ensaios de tração para o estudo de cada adesivo concluídos, assim como os respetivos estudos numéricos em JSS, foi finalmente possível obter a resistência da junta pelas duas vias e verificar se de facto o método numérico baseado em MDC representa de forma viável as condições reais em que o testes de tração foram realizados. Ao chegar a essa conclusão, pode-se admitir que se o MEF resulta para a análise de JSS, pelo que de forma análoga resultará também para juntas curvadas.

3.1.3.5.1 Curvas $P-\delta$

De seguida irá ser feita a representação das curvas força deslocamento ($P-\delta$) das JSS para cada um dos adesivos estudados e respetivos valores de L_o , assim como os valores de $P_{máx.}$

3.1.3.5.1.1 Araldite® AV 138

Para todos os L_o testados, verificou-se que as JSS têm um comportamento aproximadamente linear até ser atingida a rotura da ligação. Como todos os 8 gráficos apresentam os mesmos comportamentos, a fim de não colocar informação redundante, apresentam-se apenas os casos em que L_o é 20 mm (Figura 76) e 70 mm

(Figura 77). Foram feitos 5 testes para cada L_o , mas é de ressaltar que existiram algumas amostras que não foram validadas, muitas delas por causa de rotura prematuras do substrato, o que leva a que o gráfico da Figura 76 apresente 4 resultados e que o da Figura 77 apresente apenas 2.

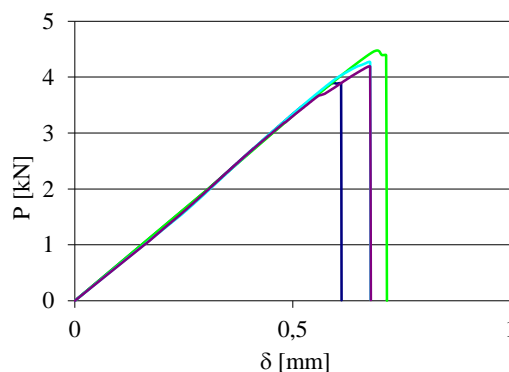


Figura 76 - Curva P - δ para o adesivo Araldite® AV138 para o L_o de 20 mm [111]

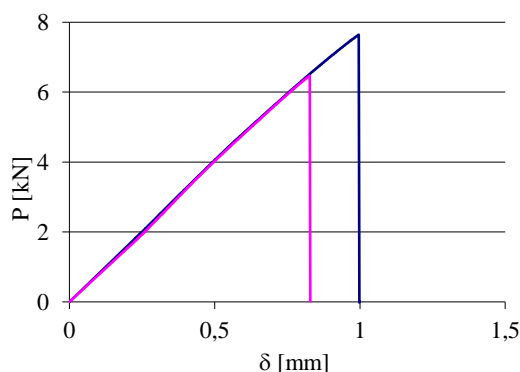


Figura 77 - Curva P - δ para o adesivo Araldite® AV138 para o L_o de 70 mm [111]

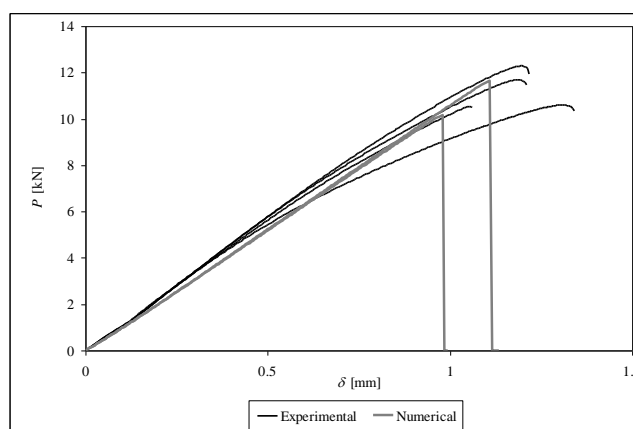
A Tabela 8 apresenta o valor médio observado de $P_{m\acute{a}x}$ para cada L_o e respetivo desvio padrão [111]. Aqui verifica-se que à medida que o L_o aumenta, o $P_{m\acute{a}x}$ registado é superior. De notar também que os desvios padrões calculados para os L_o em que todos os 5 resultados foram aceites são relativamente baixos, na ordem dos 6%, o que evidencia uma certa concordância para estes casos. Para os restantes, $P_{m\acute{a}x}$ é calculado para médias de 4, 3 e até 2 (L_o de 70 mm) e não para 5 ensaios, por causa das amostras rejeitadas. A consequência disto é que, com menos amostras, os resultados obtidos a partir destas tem pouca confiança, o que explica os maiores desvios padrão para alguns dos L_o estudados. Para o caso particular do L_o de 70 mm, pode-se até ignorar os resultados deste estudo, pois com apenas 2 amostras muito pouco se conclui sobre o comportamento desta JSS em particular.

Tabela 8 - $P_{\text{máx}}$ experimental para JSS com o adesivo Araldite® AV138 [111]

| L_o (mm) | Nº provetes ensaiados | Nº provetes validados | $P_{\text{máx}}$ (N) | Desvio Padrão (N) |
|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 10 | 5 | 4 | 4175 | 236 |
| 20 | | 4 | 4208 | 241 |
| 30 | | 5 | 4667 | 232 |
| 40 | | 5 | 5378 | 440 |
| 50 | | 4 | 5872 | 612 |
| 60 | | 5 | 6669 | 450 |
| 70 | | 2 | 7055 | 833 |
| 80 | | 3 | 8106 | 460 |

3.1.3.5.1.2 Araldite® 2015

A Figura 78 representa a curva P - δ para uma JSS com o adesivo Araldite® 2015 com um L_o de 50 mm. Aqui, para além da comparação experimental, apresenta-se também uma comparação numérica, com uma curva criada pelo método coesivo de modo misto (menor valor de $P_{\text{máx}}$) e uma outra criada pelo método coesivo de modo puro (maior valor de $P_{\text{máx}}$). Verifica-se que elasticamente, o 2015 é mais resistente que o AV138, pois aguenta maiores cargas para deformações semelhantes, mas também mais frágil que o 7888 pois apresenta uma deformação bem menor, evidenciada pelos menores valores de deslocamento na rotura.

Figura 78 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para o adesivo Araldite® 2015 para o L_o de 50 mm [112]

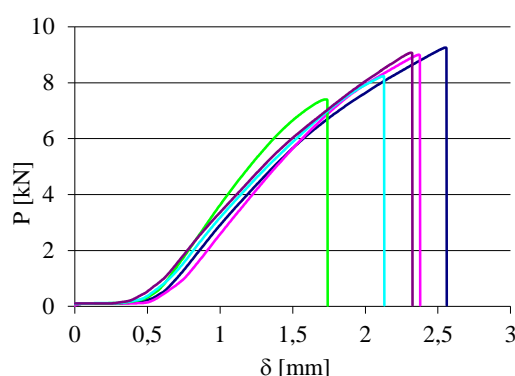
A Tabela 9 apresenta os valores de $P_{\text{máx}}$ observados para cada L_o estudado nas JSS com o adesivo Araldite® 2015. Consta-se uma vez mais que o adesivo 2015 é um adesivo de características intermédias entre o frágil AV138 e o dúctil 7888. Os desvios padrões são relativamente baixos, na ordem dos 7%, o que evidencia uma certa concordância entre os resultados dos 5 provetes testados para cada um dos L_o [112]. Verificou-se, no entanto, que muitos provetes foram rejeitados ao longo da realização dos ensaios com o 2015, o que afeta muito a credibilidade dos testes, pelo facto de o número de amostras válidas ser baixo.

Tabela 9 - $P_{\text{máx}}$ experimental para JSS com o adesivo Araldite® 2015 [112]

| L_o (mm) | Nº provetes ensaiados | Nº provetes validados | $P_{\text{máx}}$ (N) | Desvio Padrão (N) |
|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 10 | 5 | 4 | 2781 | 213 |
| 20 | | 2 | 5050 | 358 |
| 30 | | 3 | 7184 | 309 |
| 40 | | 4 | 8780 | 650 |
| 50 | | 3 | 11330 | 754 |
| 60 | | 2 | 12376 | 2035 |
| 70 | | 3 | 13215 | 1043 |
| 80 | | 2 | 16005 | 1655 |

3.1.3.5.1.3 Sikaforce® 7888

Também para este adesivo, verificou-se que em todos os L_o testados, as JSS têm um comportamento aproximadamente linear até ser atingida a rotura da ligação. Assim sendo, voltamos a apresentar apenas os casos em que L_o é 20 mm (Figura 79) e 70 mm (Figura 80). De notar que comparativamente ao adesivo Araldite® AV138, o Sikaforce® 7888 atinge valores bem superiores de deformação. Isto é de se esperar, uma vez que o 7888 é um adesivo dúctil, pelo que ao ser atingido o limite plástico, este entra no regime plástico, onde a deformação sofrida passa a ser permanente. O AV138 por outro lado é caracterizado sobretudo pela sua fragilidade, sendo que a rotura ocorre logo após o limite elástico de deformação do adesivo ser atingido. De notar, que para o L_o de 20 todos os provetes foram validados, o que acaba por dar mais confiança aos resultados obtido para este estudo em particular.

Figura 79 - Curva P - δ para o adesivo Sikaforce® 7888 para o L_o de 20 mm [111]

A Tabela 10 apresenta o valor médio observado de $P_{\text{máx}}$ para cada L_o e respetivo desvio padrão [111]. Aqui verifica-se que à medida que o L_o aumenta, o $P_{\text{máx}}$ registado é superior. Para este adesivo, o desvio padrão começa bastante elevado para o L_o de 10 mm em que este é 20%, mas à medida que os ensaios para os outros L_o são concluídos, este valor estabiliza e para 70 mm o desvio é 8,7%. Os valores $P_{\text{máx}}$ e Desvio Padrão para o L_o de 80 mm podem ser desprezados, uma vez que foram apenas validados 2

provetes, pelo que neste caso a amostra é demasiado pequena para se garantir a fiabilidade do teste [111].

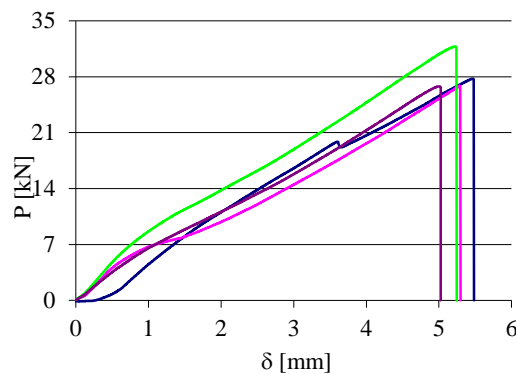


Figura 80 - Curva P - δ para o adesivo Sikaforce® 7888 para o L_o de 70 mm [111]

Tabela 10 - $P_{\text{máx}}$ experimental para JSS com o adesivo Sikaforce® 7888 [111]

| L_o (mm) | Nº provetes ensaiados | Nº provetes validados | $P_{\text{máx}}$ (N) | Desvio Padrão (N) |
|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 10 | 5 | 5 | 4663 | 947 |
| 20 | | 5 | 7948 | 939 |
| 30 | | 5 | 12822 | 1103 |
| 40 | | 5 | 17328 | 1348 |
| 50 | | 5 | 21040 | 1462 |
| 60 | | 5 | 24973 | 1510 |
| 70 | | 4 | 28623 | 2502 |
| 80 | | 2 | 31306 | 78 |

3.1.3.5.2 Modos de rotura

Nesta secção serão apresentados os modos de rotura para as JSS obtidos para os três tipos de adesivos estudados.

3.1.3.5.2.1 Adesivo Araldite® AV138

Para as JSS com o adesivo Araldite® AV138, os provetes com L_o de 10 e 20 mm tiveram uma rotura coesiva (Figura 81). Nas juntas com L_o de 30 até 80 mm observou-se uma rotura intralaminar (Figura 82) [111].

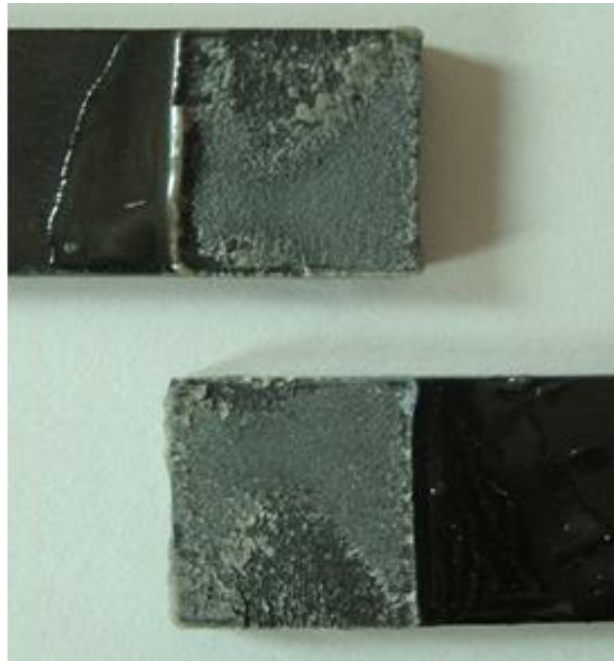


Figura 81 – Rotura coesiva nas juntas com 10 mm sobreposição com adesivo AV138 [111]

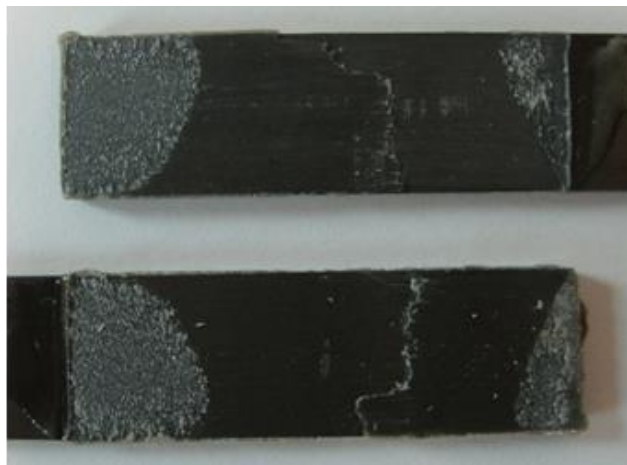


Figura 82 – Rotura intralaminar nas juntas com 40 mm de sobreposição com o adesivo AV138 [111]

3.1.3.5.2.2 Adesivo Araldite® 2015

Para todas as JSS com o adesivo Araldite® 2015, a rotura ocorreu pelo adesivo, caso em que a rotura é coesiva. A Figura 83 representa JSS com L_o de 20 mm e 80 mm, na qual é possível observar a existência de adesivo em ambas as superfícies da ligação, o que prova que a rotura não se deu pela interface nem pelo aderente [112].

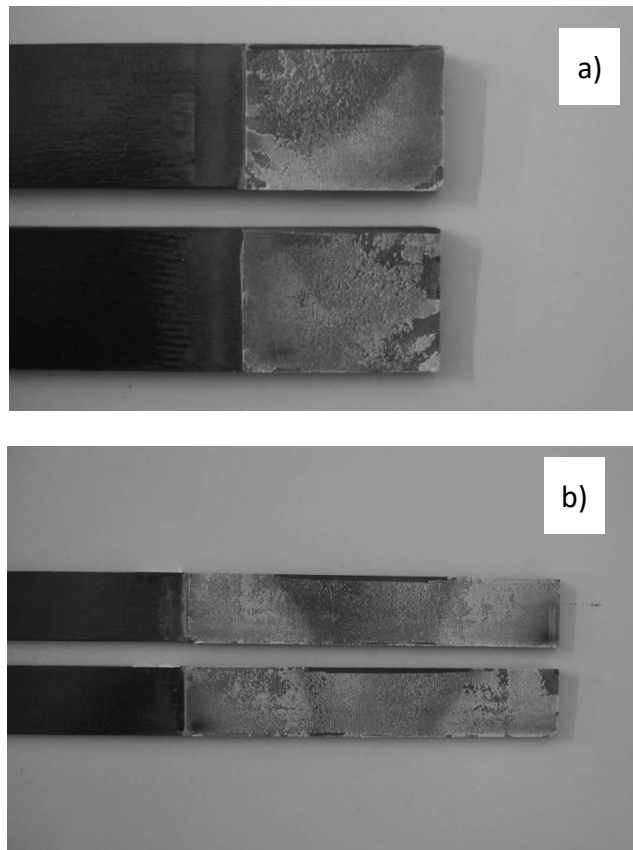


Figura 83 - Representação da rotura coesiva: a) L_o de 20mm b) L_o de 80mm [112]

3.1.3.5.2.3 Sikaforce® 7888

Nos ensaios das juntas com este adesivo todas as roturas observadas foram coesivas (Figura 84). No entanto, em algumas das juntas com L_o de 80 mm ocorreu também rotura pelo compósito, o que indica uma alteração no modo de rotura das juntas para rotura axial nos substratos, devido à magnitude das tensões axiais desenvolvidas. No entanto, nos casos em que a rotura é a evidenciada na Figura 85, esta ocorrência deve-se a um ligeiro desalinhamento das fibras com a direção longitudinal do provete, resultante do processo de empilhamento ou corte [111].

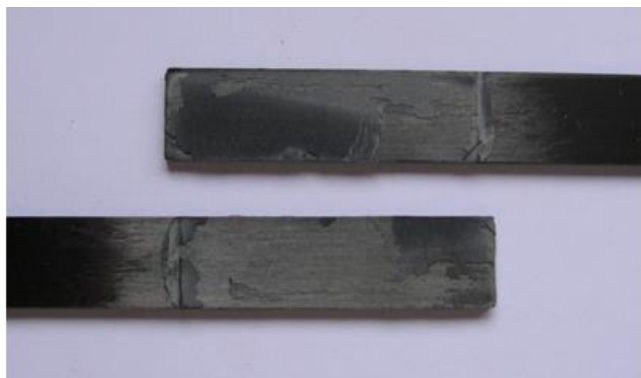


Figura 84 - Roturas obtidas nas juntas com comprimento de sobreposição de 50 mm [111]



Figura 85 - Rotura no compósito observado em algumas juntas de sobreposição simples com 80 mm de sobreposição [111]

3.1.3.5.3 Resistência das juntas e validação da técnica numérica

A Figura 86, a Figura 87 e a Figura 88 representam, respetivamente para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, as curvas de $P_{\text{máx}}$ experimental e respetivo desvio padrão em função dos vários L_o que foram estudados e as curvas de $P_{\text{máx}}$ numéricas obtidas num estudo de MEF para JSS.

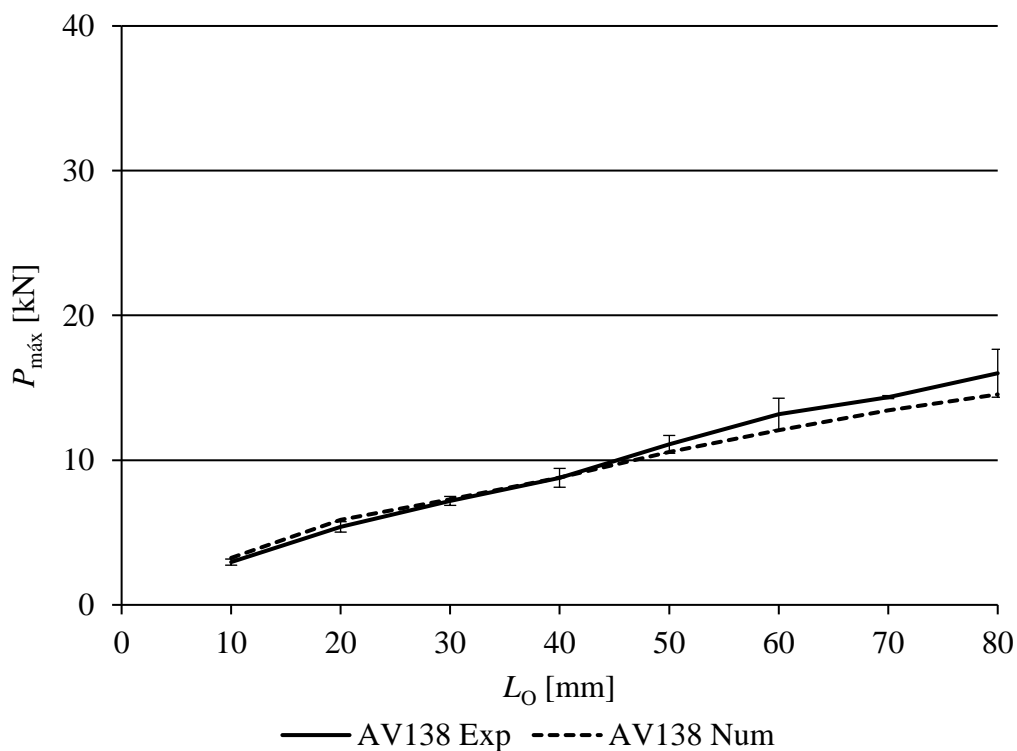


Figura 86 - $P_{\text{máx}}$ experimental e numérico para o adesivo Araldite® AV138

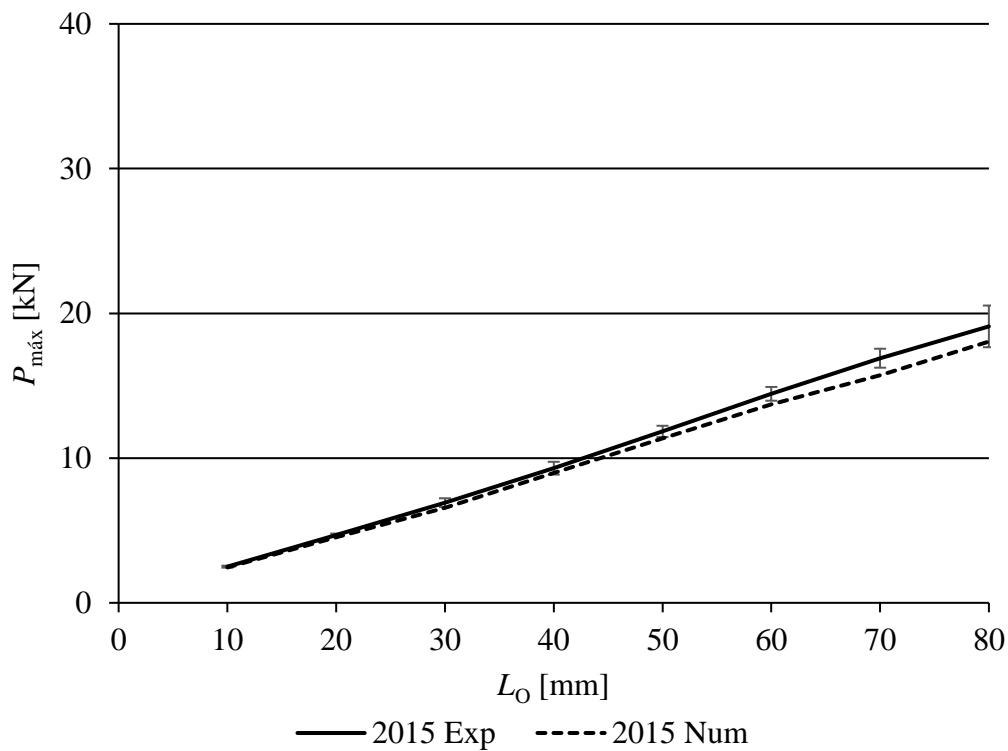


Figura 87 - $P_{máx}$ experimental e numérico para o adesivo Araldite® 2015

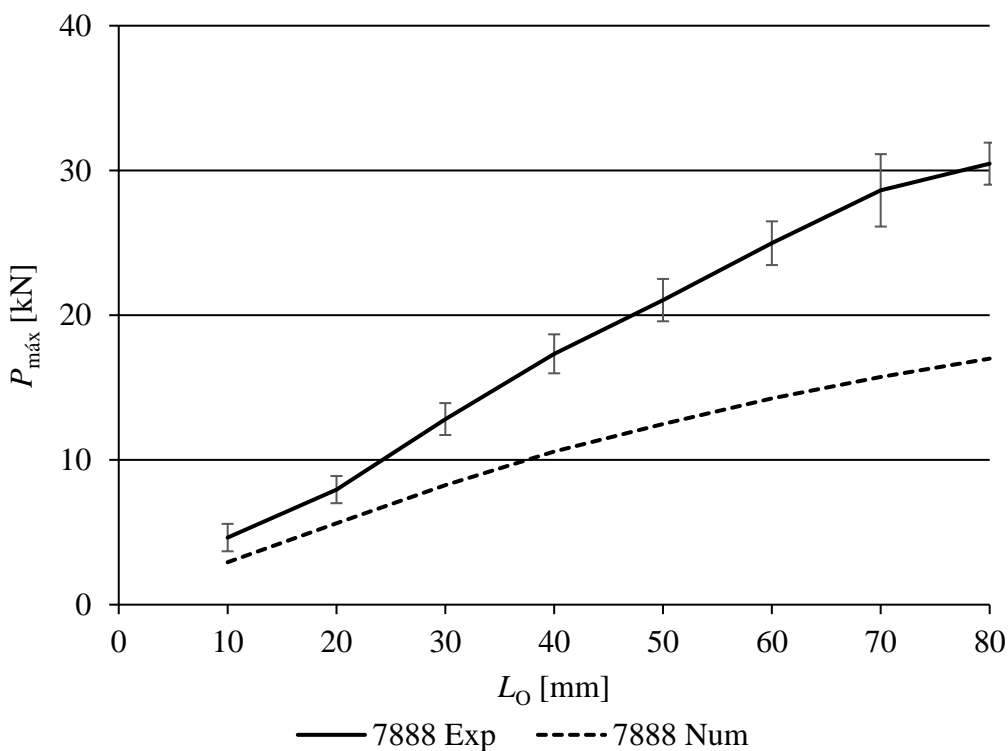


Figura 88 - $P_{máx}$ experimental e numérico para o adesivo Sikaforce® 7888

No que diz respeito à resistência dos adesivos, estes gráficos evidenciam o que já tinha sido analisado no subcapítulo 3.1.3.5.1, ou seja, que a resistência dos adesivos,

representada pelo parâmetro $P_{m\acute{a}x}$, aumenta com o incremento de L_o . No entanto, esse efeito difere consoante o adesivo em análise. Um aumento de L_o de 10 mm até 80 mm, causa um ganho de resistência de cerca de 10 kN, 15 kN e 25 kN, respetivamente, para os adesivos AV138, 2015 e 7888. Este comportamento deve-se ao facto do 7888 ser o adesivo mais dúctil entre os três analisados, pois ao não atingir logo a rotura no seu limite elástico, continua a deformar-se de forma plástica, aguentando forças cada vez superiores até ocorrer a cedência do adesivo e consequente a rotura. Por outro lado, o AV138, por ser um adesivo frágil vai entrar em rotura logo após ter atingido o seu limite elástico, aguentando por esta razão cargas menores que o 7888. O 2015 é um adesivo que, não sendo frágil, é bem menos deformável que o 7888, apresentando um comportamento intermédio relativamente aos outros dois adesivos estudados.

O principal objetivo da realização dos ensaios experimentais em JSS foi o de aferir se o método numérico a ser aplicado no estudo de juntas curvadas constitui uma aproximação fiável a situações reais. Analisando uma vez mais os gráficos, pode-se afirmar que os métodos numéricos foram bem-sucedidos em prever a resistência nas JSS com o 2015 e com o AV138, existindo no entanto, uma diferença um pouco mais considerável para maiores L_o . Mas ao analisar os resultados obtidos para o 7888 verifica-se uma grande discrepância dos resultados numéricos relativamente aos experimentais. A linearidade dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ desaparece para maiores L_o , onde ambas as curvas tomam uma forma aparentemente logarítmica indicando que, a partir de um dado valor, um aumento contínuo de L_o em nada influenciaria a resistência do adesivo. O que isto indica é que a lei coesiva triangular usada para simular o comportamento dos adesivos não é a mais adequada para o 7888. Neste caso, uma possível solução consiste na utilização de uma lei coesiva trapezoidal.

3.2 Trabalho numérico

Após a validação dos métodos numéricos a serem implementados para a previsão da resistência de juntas curvadas, foi possível dar início ao estudo paramétrico das juntas curvadas. Neste subcapítulo irá ser estudada com o maior detalhe possível a resistência de juntas curvadas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, tendo em conta que serão também analisados diferentes L_o (10 mm, 20mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm), R (1000 mm, 2000 mm e 3000 mm) e t_p (1,2 mm, 2,4 mm e 3,6 mm).

3.2.1 Leis coesivas para simulação do adesivo

Antes de começar a discutir os resultados do estudo numérico efetuado há que primeiro definir o valor dos parâmetros que simulam os adesivos. Existem estudos que consideram aceitável realizar uma aproximação, na qual se assume que estes parâmetros são idênticos aos obtidos para os ensaios de tração e de corte em provetes

maciços de adesivo [27, 119]. No entanto, isto é falso, pois existe uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina que não se pode desprezar, devido à restrição de deformações na camada do adesivo causada pelos próprios substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda, tipicamente em modo misto [120-122]. Como tal, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam de forma fiável o comportamento dos adesivos nas condições a que estes vão estar sujeitos.

3.2.1.1 Araldite® AV138

A fim de definir as leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, com descrição detalhada no trabalho de Campilho et al. [58]. Infelizmente, devido à inexistência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente do mais indicado, que foi utilizado para o adesivo Araldite® 2015, conforme se exemplificará de seguida.

Para este caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte obtidos pela realização de ensaios *Thick Adherend Shear Test* (TAST), respetivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $L_0 = 20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios.

Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com recurso a ensaios TAST. No trabalho referido [123] concluiu-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [123].

Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A = 0,2$ mm. [123]

| E [MPa] | G [MPa] | t_n^0 [MPa] | t_s^0 [MPa] | G_{IC} [N/mm] | G_{IIC} [N/mm] |
|--------------|--------------|------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| 4890 | 1560 | 39,45 | 30,2 | 0,2 | 0,38 |

3.2.1.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo do Araldite® 2015 foram determinadas num trabalho anterior [58] através de um método inverso. Num estudo anterior [124] é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de

ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo.

A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 12 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto [123]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [125] e ensaios TAST [126], respetivamente.

Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com $t_A=0,2$ mm. [123]

| E [MPa] | G [MPa] | t_n^0 [MPa] | t_s^0 [MPa] | G_{IC} [N/mm] | G_{IIC} [N/mm] |
|--------------|--------------|------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| 1850 | 560 | 21,63 | 17,9 | 0,43 | 4,7 |

3.2.1.3 Sikaforce 7888

No caso do adesivo Sikaforce® 7888 não se encontram disponíveis até à data as propriedades coesivas obtidas por métodos inversos. Para este adesivo, foram utilizados como aproximação valores de t_n^0 e t_s^0 obtidos por ensaios de adesivo à tração e dados do fabricante, respetivamente. Para os valores de G_{IC} e G_{IIC} , foram utilizados valores obtidos através de ensaios DCB e ENF, pela respetiva ordem. A generalidade dos valores das propriedades presentes na Tabela 13 foram obtidos experimentalmente no trabalho de Neto [111], à exceção de G , t_s^0 e G_{IC} .

Para G_{IC} não foi utilizado o valor apresentado por [111], devido à obtenção de roturas parcialmente adesivas, indicativas de uma medição incorreta desse valor. Em alternativa, foi utilizado o valor obtido por [127], em que G_{IC} foi definido num ensaio DCB de provetes de compósito de fibra natural de juta com matriz de epóxico. Para os valores de G e t_s^0 foram considerados os valores do fabricante. No trabalho de Neto [111], os valores de E e t_n^0 foram obtidos por ensaios de adesivos à tração, com recurso a um extensómetro, fixo na zona de menor secção do provete, a uma velocidade de 1mm/minuto. Foram registados os valores de P e δ até ocorrer a rotura e posteriormente tratados no software Microsoft Excel®.

Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7888 com $t_A=0,2$ mm. [123]

| E [MPa] | G [MPa] | t_n^0 [MPa] | t_s^0 [MPa] | G_{IC} [N/mm] | G_{IIC} [N/mm] |
|--------------|--------------|------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| 1890 | 727 | 28,60 | 20 | 0,7023 | 8,72 |

3.2.2 Estudo de parâmetros geométricos

Procede-se agora à apresentação dos resultados do estudo numérico. Os parâmetros estudados foram o L_o , o t_p e o R . A influência destes foi verificada com análises ao nível da resistência da junta e respetivas tensões, energia dissipada e dano existente ao longo do L_o dos adesivos.

3.2.2.1 Estudo das tensões de corte

Nesta primeira secção de resultados o objetivo é o de analisar as tensões de corte da junta. A Figura 89 apresenta a variação da tensão de corte (τ_y/τ_{avg}), normalizada pela tensão de corte média (τ_{avg}), registada ao longo da zona de sobreposição da ligação adesiva para os vários L_o estudados. A situação demonstrada na figura corresponde aos casos em que o R é 2000 mm, t_p é 2,4 mm e o adesivo estudado é o Araldite® 2015, a fim de ser clara a influência de L_o .

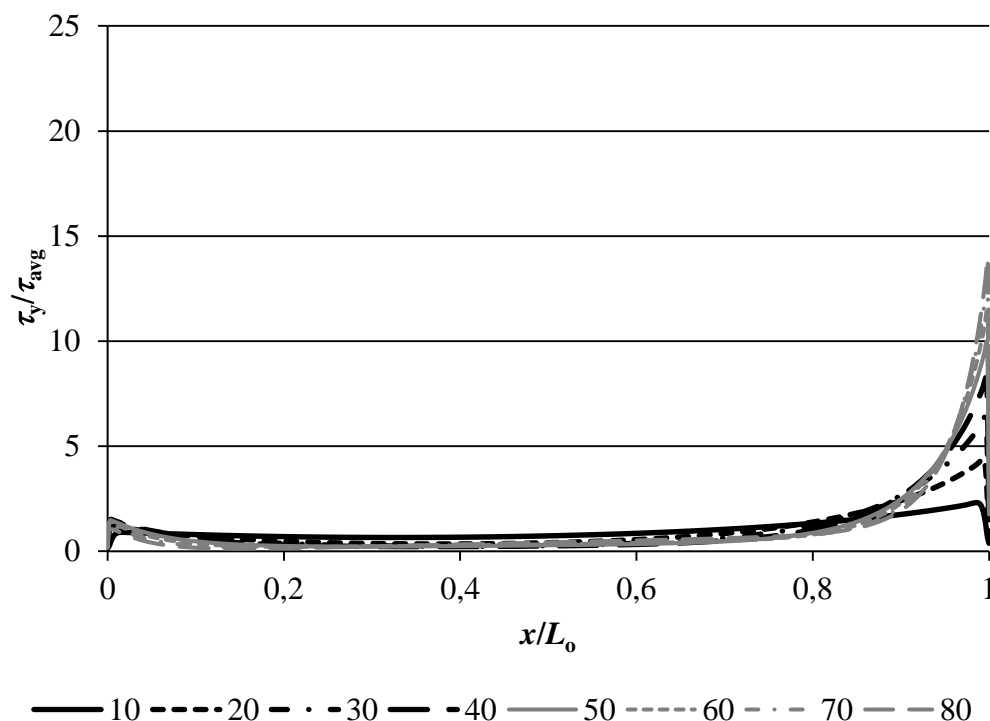


Figura 89 - Tensão de corte em função do L_o para $t_p = 2,4$ mm, Araldite® 2015 e R de 2000 mm

Pela análise da Figura 89, consegue-se verificar uma clara diferença dos picos de tensões, no qual a tensão de corte na extremidade direita do comprimento de sobreposição é muito superior à tensão de corte na extremidade esquerda do L_o . Este facto pode ser explicado pela curvatura da junta. Como já visto no subcapítulo 3.1.1, o aderente do lado esquerdo está encastrado, enquanto o aderente do lado esquerdo está a ser tracionado, podendo assim originar tensões muito superiores na extremidade direita da zona de sobreposição dos aderentes. No centro da zona de sobreposição da junta, a tensão é quase nula, por causa da deformação diferencial dos substratos, em que a tensão na extremidade livre é nula, sendo que esta aumenta de forma progressiva até à extremidade oposta.

Relativamente à influência do L_o , o que se verifica pela análise da Figura 89 é que à medida que este aumenta, regista-se um aumento da tensão máxima. É de reparar que este fenómeno é apenas notado na mesma extremidade direita já referida atrás, ou seja, em se considerar o comprimento da junta a partir da esquerda para a direita, significa que nos primeiros 90% de L_o a influência do mesmo é desprezável no que diz respeito à tensão de corte do adesivo.

A mesma situação é analisada na Figura 90 e na Figura 91, sendo que neste caso, os adesivos utilizados são, respetivamente, o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7888.

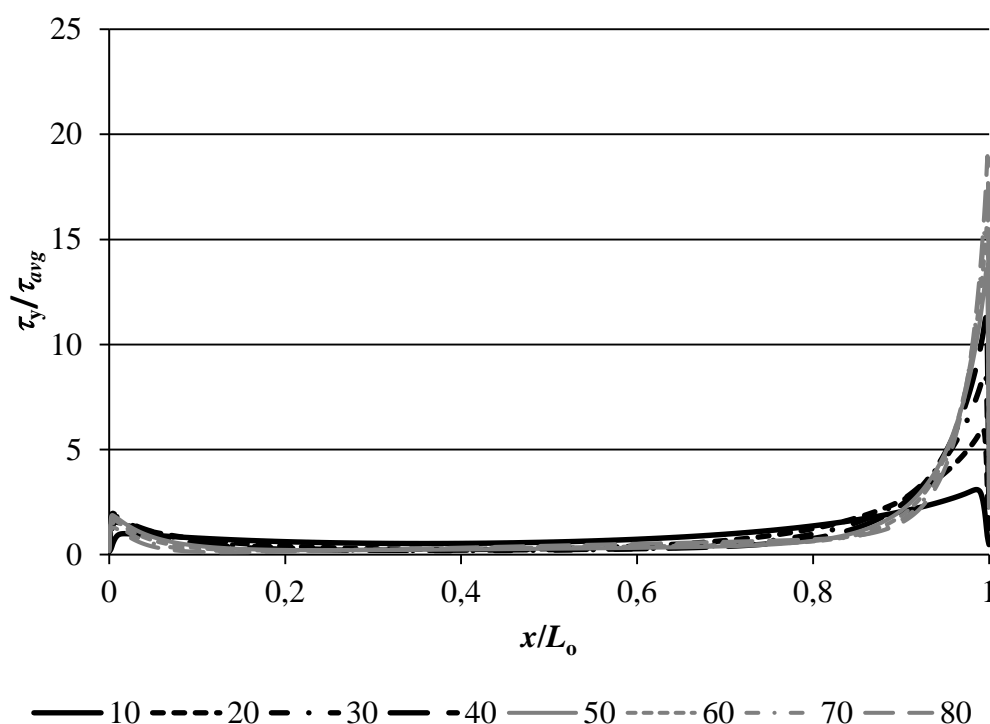


Figura 90 - Tensão de corte em função do L_o para $t_p = 2,4$ mm, Araldite® AV138 e R de 2000 mm

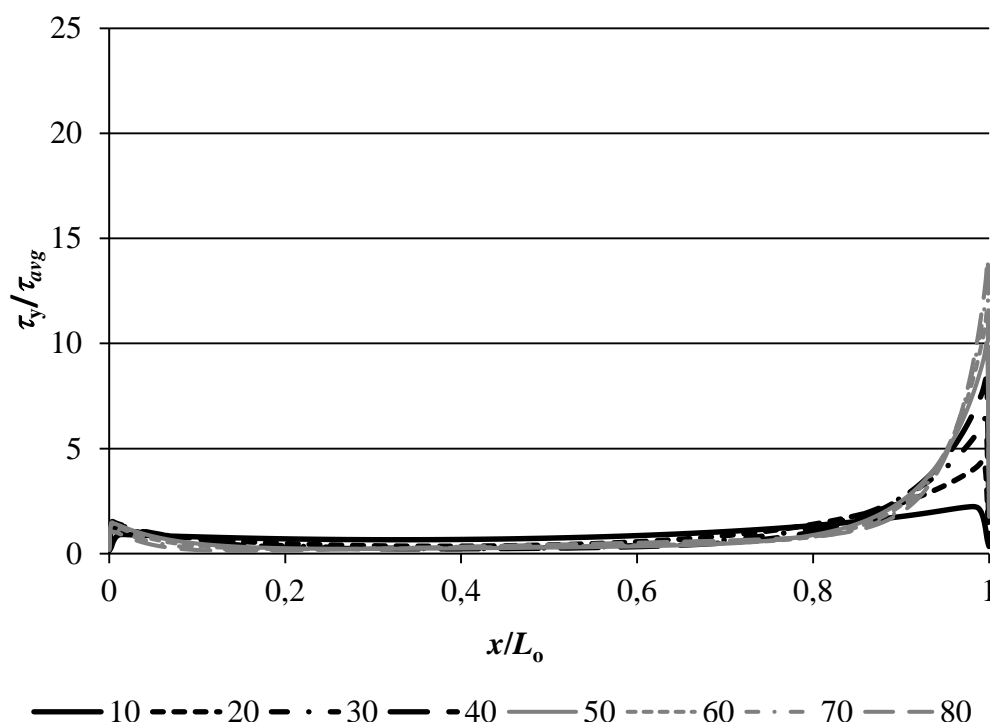


Figura 91 - Tensão de corte em função do L_o para $t_p = 2,4$ mm, Sikaforce® 7888 e R de 2000 mm

Relativamente aos adesivos em estudo, verifica-se que o AV138 regista tensões de corte superiores às do 2015. Isto pode ser explicado pelo facto de o AV138 ser o adesivo mais rígido, o que indica que nas extremidades da zona de sobreposição vai ter gradientes de tensão significativos. Estes aparecem, uma vez que a rigidez do AV138 é muito elevada, o que acaba por originar picos de tensão muito elevados em ambas as extremidades da ligação, daí o elevado gradiente de tensões. O mesmo raciocínio explica o resultado quase igual observado entre o 2015 e o 7888, uma vez que a rigidez de ambos é quase igual (1890 MPa para o 7888 e 1850 MPa para o 2015).

A Figura 92 representa a variação da tensão de corte (τ_y/τ_{avg}) registada ao longo do L_o da ligação adesiva para os vários t_p estudados, considerando que a junta usa o adesivo Araldite® 2015 e que tem um R de 2000 mm. A fim de se verificar melhor a influência do t_p no comportamento de juntas adesivas, o gráfico da Figura 92 foi executado para os L_o de 10 mm e 80 mm. Verifica-se pela análise da Figura 92 que as maiores tensões se encontram na extremidade direita do adesivo. No meio as tensões são quase nulas e, na extremidade esquerda, tem-se o segundo pico de tensão, de magnitude muito menor à registada no ponto oposto. No que diz respeito à influência de t_p no valor destas tensões, é possível ver pela análise das curvas a tracejado (curvas em que L_o é 80 mm), que um aumento deste, causa uma diminuição bastante significativa dos picos de tensão de corte. Esta ocorrência é explicada pela curvatura dos aderentes, onde a deformação prévia destes para a criação da junta acaba por

causar uma menor capacidade de deformação axial da junta, o que por sua vez explica as menores tensões de corte.

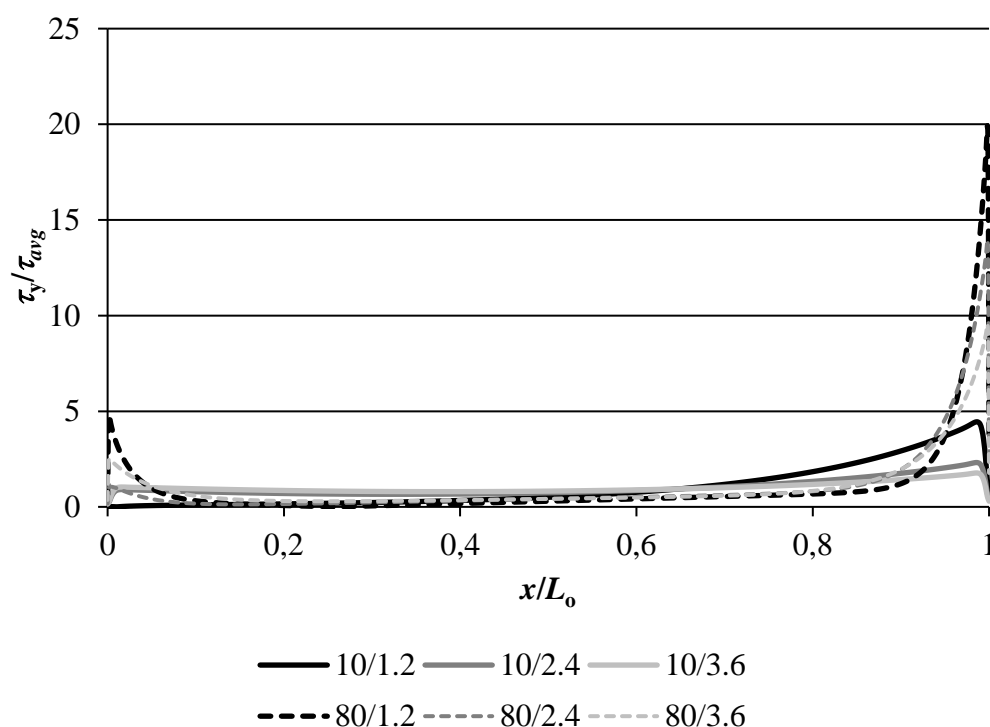


Figura 92 - Tensão de corte em função do t_p , para L_0 de 10 mm e 80 mm, R de 2000 mm, considerando que a junta usa o adesivo Araldite® 2015

3.2.2.2 Estudo das tensões de arrancamento

Neste subcapítulo trata-se das tensões de arrancamento, estudando as influências dos parâmetros L_0 e t_p da junta, assim como o adesivo utilizado.

A Figura 93 apresenta a variação da tensão de arrancamento (σ_y/τ_{avg}), normalizada pela tensão de corte média (τ_{avg}), registada ao longo da zona de sobreposição da ligação adesiva para os vários L_0 estudados. A situação demonstrada na figura corresponde aos casos em que o R é 2000 mm, t_p é 2,4 mm em que o adesivo estudado é o Araldite® 2015, a fim de ser clara a influência de L_0 .

É possível detetar algumas semelhanças relativamente ao gráfico que apresentou as tensões de corte. Em ambos os casos, um aumento de L_0 causa um aumento da respetiva tensão e a localização destas é maioritariamente na extremidade direita da zona de sobreposição, o que indica uma vez mais que o L_0 tem influência desprezável nas tensões do adesivo em toda a parte esquerda e maioria da parte direita da zona de sobreposição. Há que notar ainda que, imediatamente antes da zona do maior pico de tensão, existe compressão no adesivo. Aliás, verifica-se que, ao aumentar o L_0 , existe um ligeiro crescimento, não completamente desprezável, da tensão de compressão registada no adesivo, facto este que pode ser explicado uma

vez mais pelo já referido efeito que a curvatura tem na tensão da zona da extremidade da direita.

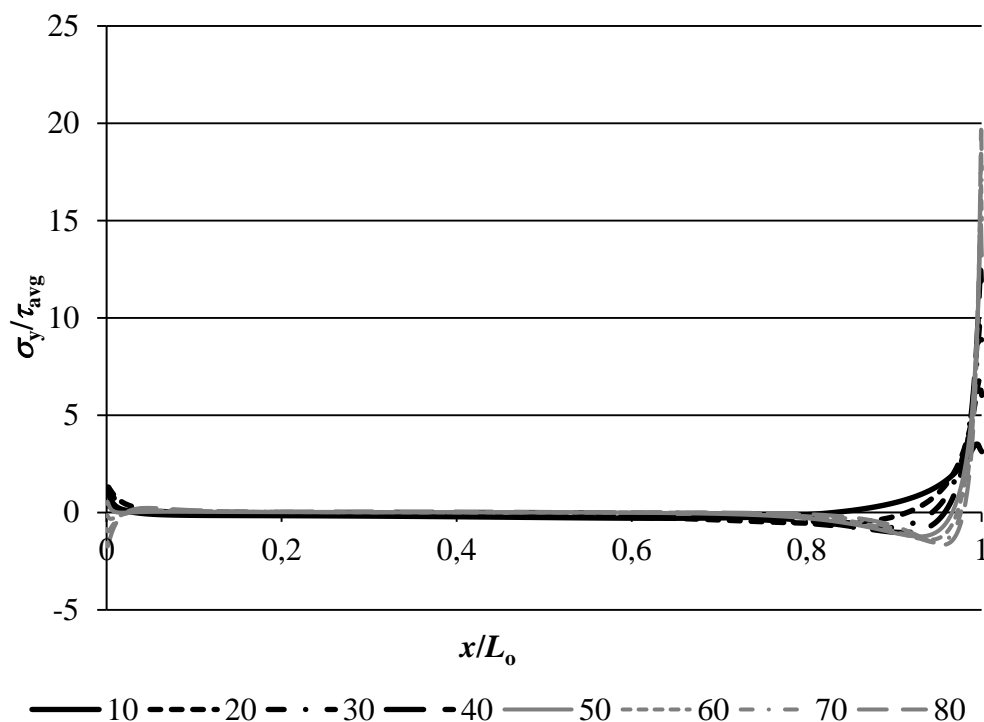


Figura 93 - Tensão de arrancamento em função do L_o , para t_p de 2,4 mm, Araldite® 2015 e R de 2000 mm

Por outro lado, o aumento dos picos de tensão de arrancamento é tanto maior quanto maior for o momento nas extremidades. Aqui, a componente vertical da carga aplicada causa um momento na extremidade, tanto mais superior, quanto maior for a distância no plano X do ponto da extremidade livre ao ponto da extremidade da zona de sobreposição, o que por sua vez causa maiores momentos e consequentemente maiores tensões. Verifica-se também, para valores de L_o acima de 60 mm, a existência de um pico de tensão de compressão na extremidade esquerda. Apesar de as tensões nesta extremidade serem quase desprezáveis comparativamente às tensões registadas na ponta oposta, não deixa de ser curioso este comportamento que a junta exhibe para estes valores de L_o . A existência destas zonas, onde o adesivo está à compressão, é ideal para o bom funcionamento da junta, pois indica que pelos menos nestas áreas não existe risco de arrancamento.

A mesma situação é analisada na Figura 94 e na Figura 95, sendo que neste caso os adesivos utilizados são, respetivamente, o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7888.

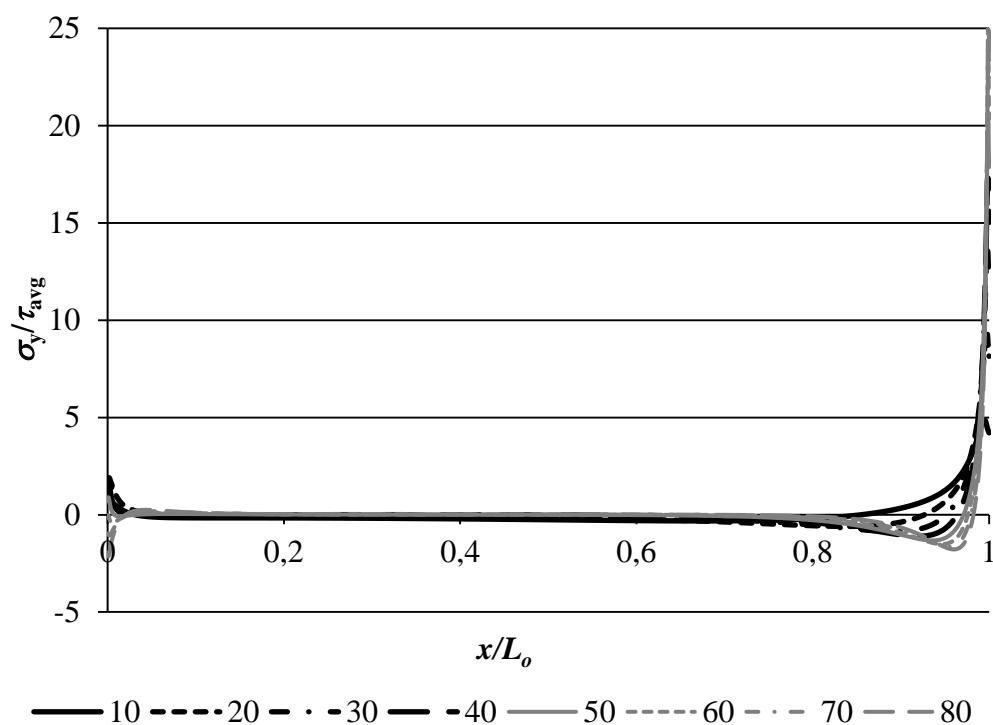


Figura 94 - Tensão de arrancamento em função do L_o , para t_p de 2,4 mm, Araldite® AV138 e R de 2000 mm

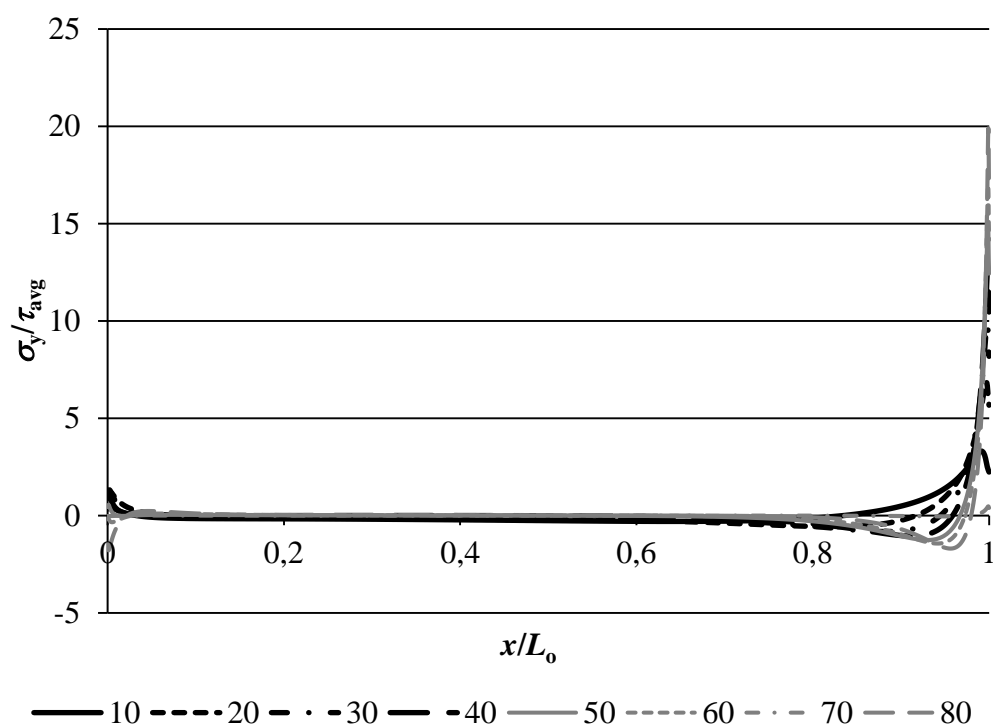


Figura 95 - Tensão de arrancamento em função do L_o , para t_p de 2,4 mm, Sikaforce® AV138 e R de 2000 mm

Tal como foi constatado na análise das tensões de corte, é uma vez mais o AV138 a registar as maiores tensões de arrancamento ao longo do adesivo. É o adesivo

mais rígido em estudo, e como tal, uma vez que apresenta pouco potencial para ser deformado é de se esperar que qualquer junta colada com este adesivo sofra problemas relacionados com o arrancamento. Relativamente aos resultados observados no estudo das tensões de corte, a grande diferença nos resultados das tensões de arrancamento é que o 7888 regista menores tensões de arrancamento que o 2015. Como as juntas adesivas em geral tendem a ter um mau desempenho com a existência de arrancamento, é importante olhar para a deformabilidade dos adesivos quando se está a analisar esta situação. Assim sendo, o 2015, sendo um adesivo mais frágil do que o 7888, vai ter menor capacidade de deformação e, como tal, sofre mais os efeitos do arrancamento, representados pela maior tensão de arrancamento registada ao longo da camada de adesivo.

A Figura 96 representa a variação da tensão de arrancamento (σ_y/τ_{avg}) registada ao longo do comprimento de sobreposição da ligação adesiva para os vários t_p estudados, considerando o adesivo Araldite® 2015 e um R de 2000 mm. A fim de se verificar melhor a influência do t_p no comportamento de juntas adesivas, o gráfico foi executado para os L_o de 10 mm e 80 mm.

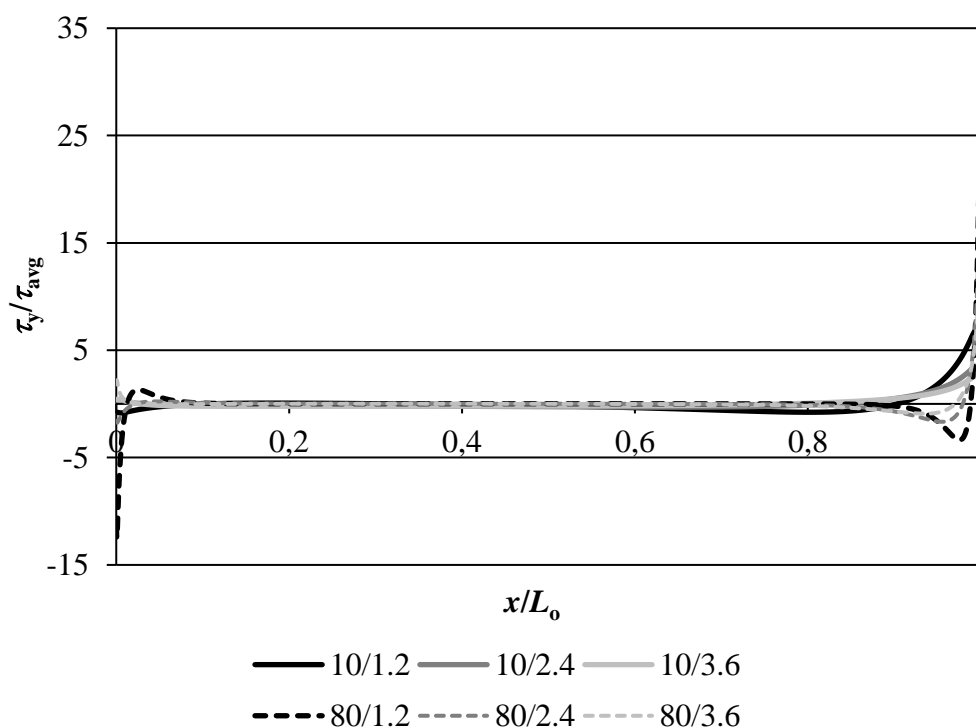


Figura 96 - Tensão de arrancamento em função do t_p , para L_o de 10 mm e 80 mm, R de 2000 mm, considerando que a junta usa o adesivo Araldite® 2015

Tal como foi verificado no estudo das tensões de corte, para maiores valores de t_p , tem-se uma diminuição muito considerável das tensões de arrancamento. Conjuntamente, os gráficos da Figura 92 e Figura 96 indicam que o desempenho das juntas curvadas é superior para maiores valores de t_p , já que as tensões internas do

adesivo diminuem à medida que este parâmetro toma maiores valores. Esta diferença, no sentido de analisar apenas as tensões de arrancamento no adesivo, é explicada uma vez mais pela curvatura dos aderentes, onde a deformação prévia destes para a criação da junta acaba por causar uma menor capacidade de deformação transversal da junta, o que por sua vez explica as menores tensões de arrancamento.

3.2.2.3 Estudo da variável de dano

Neste subcapítulo, o foco irá incidir na variável de dano, estudando as influências dos parâmetros L_0 e t_p da junta, assim como do adesivo utilizado. O parâmetro utilizado para a realização deste estudo foi o *Stiffness Degradation* (SDEG), também este medido ao longo da sobreposição dos aderentes. Esta variável fornece uma estimativa da degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto do MDC (Figura 56) e varia entre 0 (ausência de dano) e 1 (rotura completa). A Figura 97 representa a variação do parâmetro SDEG ao longo dos vários comprimentos de sobreposição estudados. Uma vez mais, o adesivo demonstrado neste gráfico é o 2015, o R é 2000 mm e o t_p é 2,4 mm, a fim de perceber melhor a influência do L_0 .

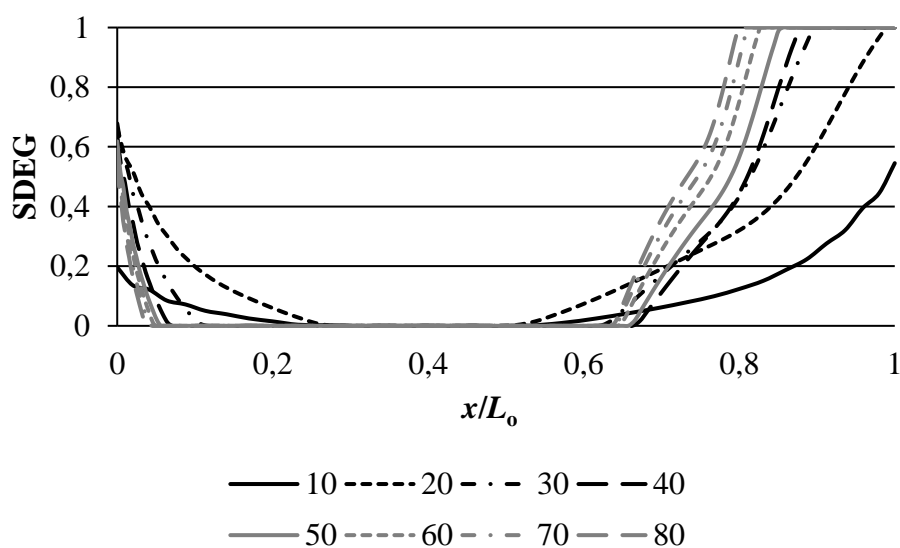


Figura 97 - Variação da variável SDEG em função do comprimento de sobreposição para t_p de 2,4 mm, Araldite® 2015 e R de 2000 mm

Visto que as maiores tensões se encontram na extremidade direita da sobreposição, é de esperar que o maior dano ocorra nesta zona do adesivo, o que se verifica pela análise da Figura 97. Assim sendo, uma vez que o L_0 causa de forma proporcional um aumento da tensão máxima, pode-se de forma análoga concluir que maiores L_0 induzem maiores danos no adesivo. Verifica-se que independentemente do valor de L_0 existe uma zona central na camada de adesivo onde não se regista qualquer dano sendo que, a partir de $x/L_0 \approx 0,55$, começa a existir dano que aumenta de forma aproximadamente linear, até se atingir zonas onde ocorre rotura completa do adesivo.

Ao realizar aproximações lineares às curvas que caracterizam o dano dos adesivos, conclui-se que o declive destas aumenta com o valor de L_0 , sendo que para os maiores L_0 , já ocorre rotura na camada para 0,7 de x/L_0 . De realçar ainda que a junta com L_0 de 10 mm é a única que não entra em rotura em qualquer zona da camada de adesivo. Registam-se menores valores de SDEG no local da extremidade esquerda, correspondente ao segundo pico de tensão, mas não desprezáveis em termos de dano onde, para todos os casos, com exceção da junta com L_0 de 10 mm, tem-se dano superior a 60%.

Na Figura 98 estão representadas as diferenças entre os 3 adesivos estudados relativamente à variável de dano. Este gráfico foi feito para um t_p de 1,2 mm e para valores de L_0 de 10 mm e 80 mm. A razão pela qual é usado um gráfico com t_p de 1,2 mm e não 2,4 mm é que, para este último valor, as curvas de SDEG correspondentes aos adesivos 2015 e 7888 são quase sobrepostas.

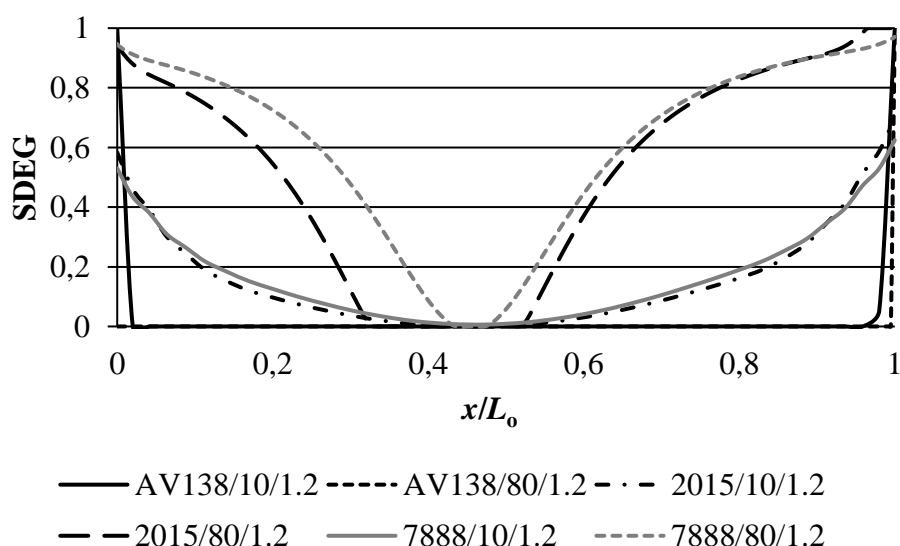


Figura 98 - Variação da variável SDEG para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para R de 2000 mm, t_p de 1,2 mm e L_0 de 10 e 80 mm

Analisando a figura, verifica-se que o AV138 é aquele que menos dano regista. Aliás, para este adesivo, aproximadamente 95% da camada não regista qualquer dano. No entanto, sendo este um adesivo caracterizado pela sua fragilidade, nas zonas correspondentes aos picos de tensão, mal seja atingido o limite elástico, ocorre logo rotura do adesivo, e consequentemente da junta, razão pela qual se verifica um aumento praticamente vertical nas duas extremidades. Os adesivos 2015 e 7888 são adesivos com uma grande capacidade de deformação plástica, capazes de redistribuir tensões ao longo da camada. As diferenças verificadas para as curvas destes dois adesivos são menos perceptíveis para maiores valores de t_p , e para este caso em particular com t_p de 1,2 mm, constata-se que o 7888 é aquele que maior dano regista. Isto deve-se ao facto de este ser um adesivo mais dúctil que o 2015 e, como tal,

consegue fazer uma melhor redistribuição de tensões ao longo da camada de adesivo, e do respetivo dano. Isto significa que, entre os 3 adesivos estudados, as juntas com o 7888 são as que conseguem aproveitar a maioria da resistência do adesivo, o que indica que estas têm um desempenho mais elevado em termos de resistência e durabilidade do que as juntas com o AV138 e o 2015.

A Figura 99 representa a variação da variável SDEG registada ao longo de L_0 para os vários t_p estudados, considerando que a junta usa o adesivo Araldite® 2015 e que tem um R de 2000 mm. A fim de se verificar melhor a influência do t_p no comportamento das juntas adesivas, o gráfico foi executado para os L_0 de 10 mm e 80 mm.

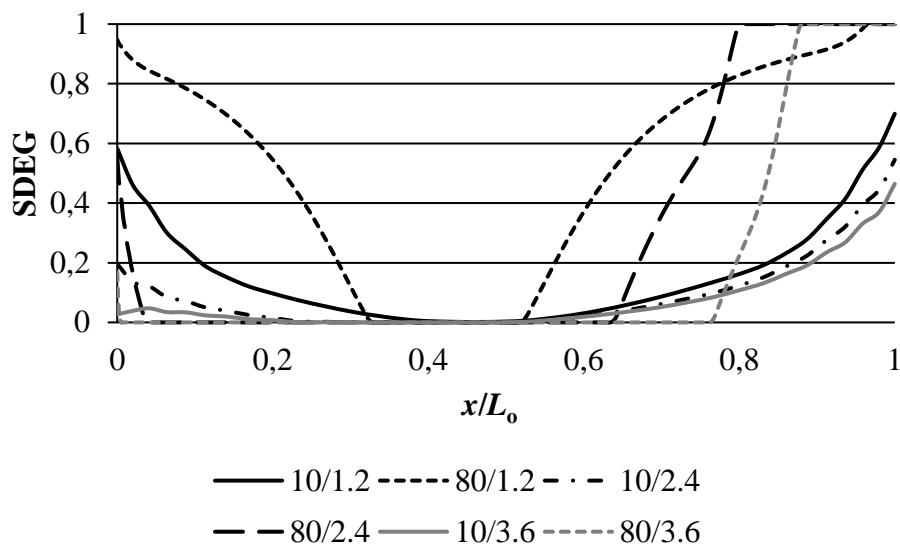


Figura 99 - Variação da variável SDEG em função de t_p para L_0 de 10 mm e 80mm, Araldite® 2015 e R de 2000 mm

Verifica-se pela análise desta figura que, à medida que o valor de t_p aumenta, o dano registado pela variável (SDEG) é globalmente menor ao longo da camada de adesivo. Este efeito é mais visível nas zonas onde ocorrem os picos de tensão, onde o dano é maior, só que, como já foi visto na análise das tensões de arrancamento e de corte, também o dano é menor para maiores valores de t_p . Esta ocorrência, como visto para os casos das tensões, é explicada pela curvatura dos aderentes. De facto, a sua deformação afeta a capacidade de deformação das juntas, sendo que nas juntas com maiores valores de t_p , onde a deformação dos aderentes é maior, o dano registado é menor. Independentemente do valor de t_p , o modo global da distribuição do dano no adesivo é o mesmo. No centro, observa-se uma zona onde SDEG é nulo. Na esquerda, regista-se uma zona correspondente ao menor pico de tensão onde SDEG tem valores moderados. Na direita, existe uma zona correspondente ao maior pico de tensão, onde SDEG toma o valor de 1 para espessuras de 1,2 mm e 2,4 mm para o caso em que L_0 é 80, sendo que nos 3 restantes, o dano registado pelo SDEG toma valores a rondar os 0,6.

3.2.2.4 Previsão da resistência

Neste subcapítulo, apresenta-se a previsão da resistência, estudando as influências dos parâmetros L_o e t_p da junta, assim como do adesivo utilizado. Para realizar este estudo o parâmetro a ser controlado é o $P_{m\acute{a}x}$, que indica o valor da força máxima registada nos ensaios numéricos dos adesivos.

As 3 figuras seguintes incluem 3 curvas cada, que representam a resistência dos 3 adesivos estudados ao longo dos diferentes L_o em análise. A Figura 100 é para um t_p de 1,2 mm, a Figura 101 é para um t_p de 2,4 mm e a Figura 102 é para um t_p de 3,6 mm. Todos os gráficos foram realizados para um valor de R de 2000 mm.

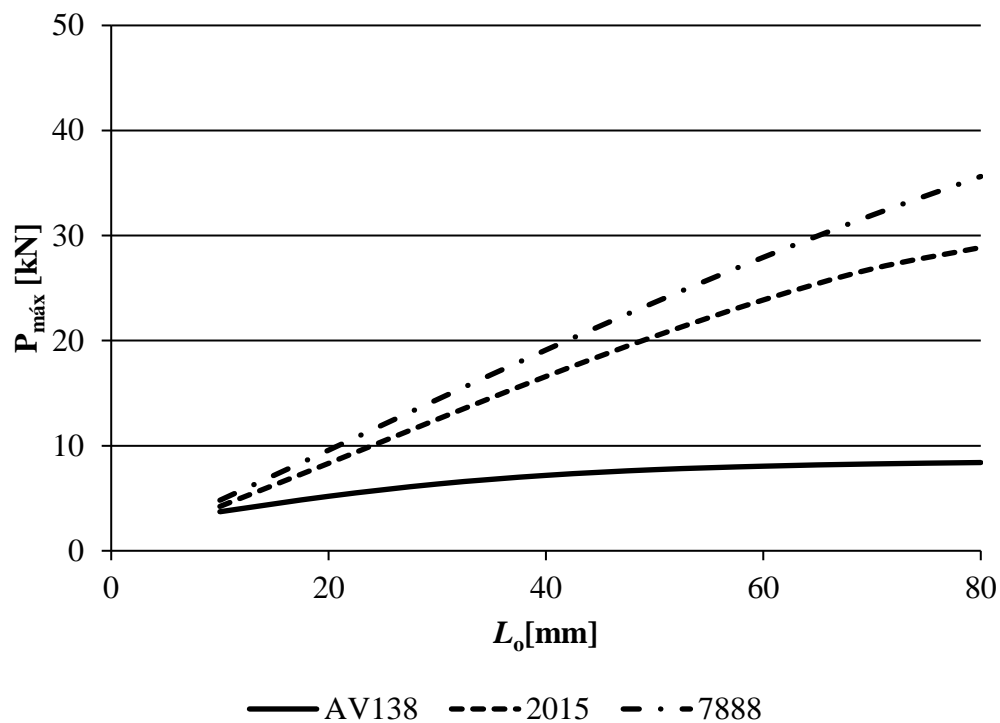


Figura 100 - Valor de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 1,2 mm

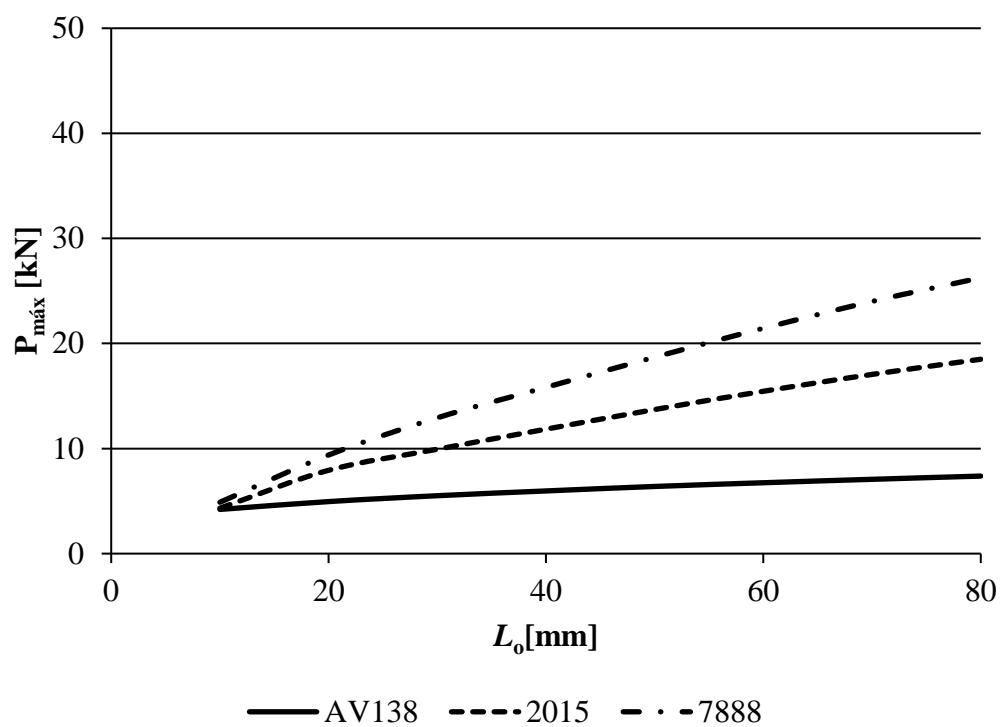


Figura 101 - Valor de $P_{máx}$ em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 2,4 mm

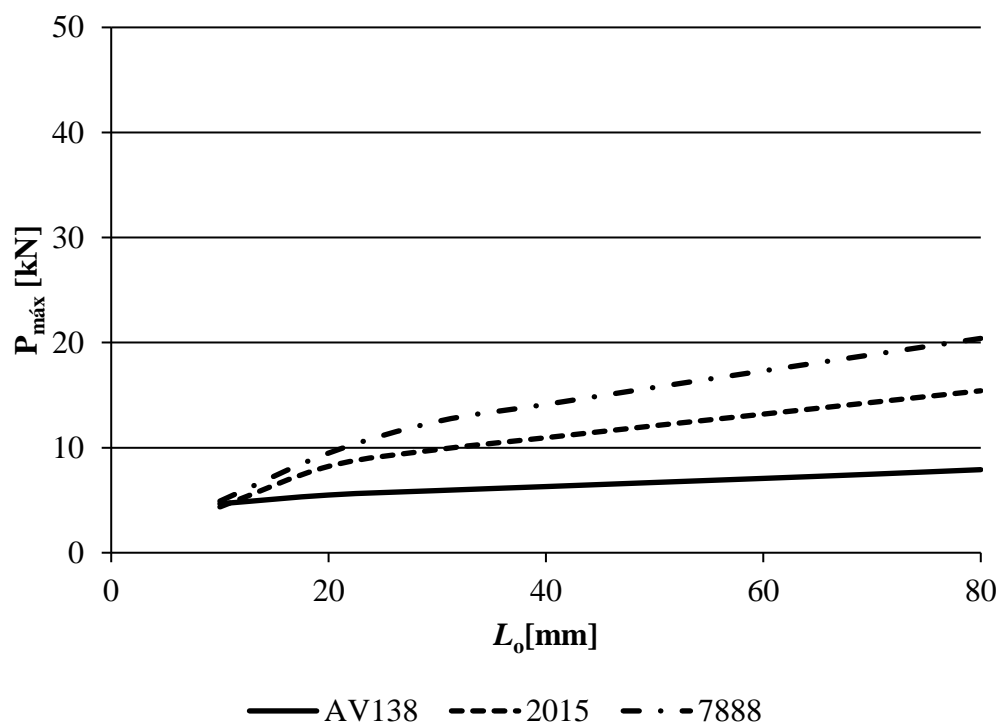


Figura 102 - Valor de $P_{máx}$ em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 3,6 mm

Olhando apenas para a influência de L_o , verifica-se que à medida que este aumenta, também o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é cada vez maior. Este efeito do L_o é bem mais visível nos adesivos dúcteis 7888 e 2015, comparativamente ao adesivo frágil AV138, onde o ganho de resistência efetivamente existe, mas é muito baixo. A influência de L_o na resistência da junta acaba por ser nitidamente menor do que a que verificada no estudo das tensões, e a explicação que pode estar por detrás deste comportamento em particular. Ainda que as tensões aumentem de forma muito significativa com L_o , este parâmetro também causa um aumento da área de contacto da zona de sobreposição, o que por sua vez resulta numa variação não proporcional de $P_{m\acute{a}x}$ com L_o , o que é visível sobretudo para as juntas curvadas com o adesivo AV138.

Pela análise da Figura 100, Figura 101 e Figura 102, verifica-se ainda uma relação de proporcionalidade inversa entre t_p e $P_{m\acute{a}x}$, onde o aumento de t_p provoca uma diminuição de $P_{m\acute{a}x}$. Constata-se ainda que esta diminuição de $P_{m\acute{a}x}$ é bastante drástica, sobretudo para maiores valores de L_o . Por exemplo, para uma junta curvada com um t_p de 1,2 mm, adesivo 2015 e L_o de 80 mm, o $P_{m\acute{a}x}$ é de aproximadamente 29 kN. Para a mesma junta, mas com valores de t_p de 2,4 mm e 3,6 mm, $P_{m\acute{a}x}$ toma, respetivamente valores de 19 kN e 15 kN. Ou seja, ao aumentar-se o t_p em 2,4 mm, a junta perdeu praticamente metade da sua resistência, isto para um adesivo dúctil como o 2015 ou o 7888, onde estes efeitos são muito mais gravosos e claros do que nas juntas com o AV138, onde as curvas de resistência ao longo dos três valores de t_p estudados são praticamente iguais. Como já foi referido, a perda de resistência para maiores valores t_p esta relacionada com a própria fabricação da junta, onde a deformação imposta nos aderentes, para a formação da sua curvatura, acaba por afetar a capacidade de deformação das juntas. Como tal, não podendo os adesivos dúcteis atingir maiores deformações ao longo da camada, a rotura acaba por ocorrer de forma prematura.

Relativamente aos adesivos, já foram discutidas as diferenças entre os resultados observados para os adesivos dúcteis (7888 e 2015) e para o adesivo frágil AV138. No entanto, ainda não foram comentadas as diferenças observadas entre o comportamento dos adesivos 7888 e 2015. Verifica-se que o 7888 possui um desempenho ligeiramente superior ao apresentado pelo 2015 de forma consistente em todos os três gráficos. Isto é uma vez mais devido ao facto de o 7888 ser um pouco mais dúctil que o 2015 e, tendo o primeiro uma capacidade de deformação extra da camada, melhor redistribuição de tensões, acaba logicamente por resistir um pouco mais ao carregamento imposto.

3.2.2.5 *Previsão da energia dissipada*

Neste subcapítulo, analisa-se a previsão da energia dissipada, estudando as influências dos parâmetros L_o e t_p da junta, assim como do adesivo utilizado. A Figura

103 é para um t_p de 1,2 mm, a Figura 104 é para um t_p de 2,4 mm e a Figura 105 é para um t_p de 3,6 mm. Todos os gráficos foram realizados para um valor de R de 2000 mm.

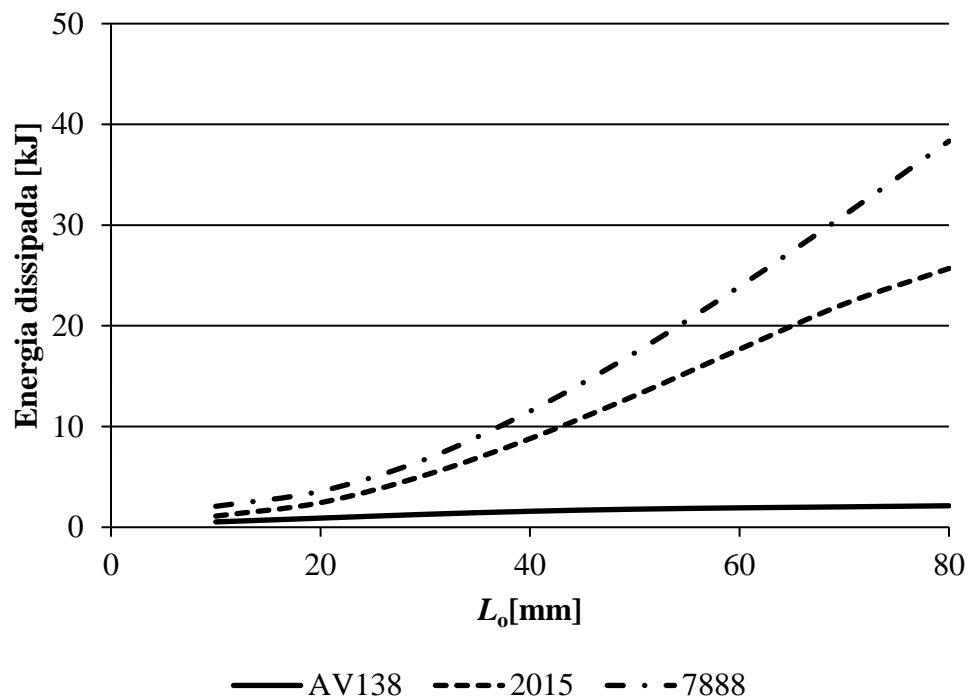


Figura 103 – Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 1,2 mm

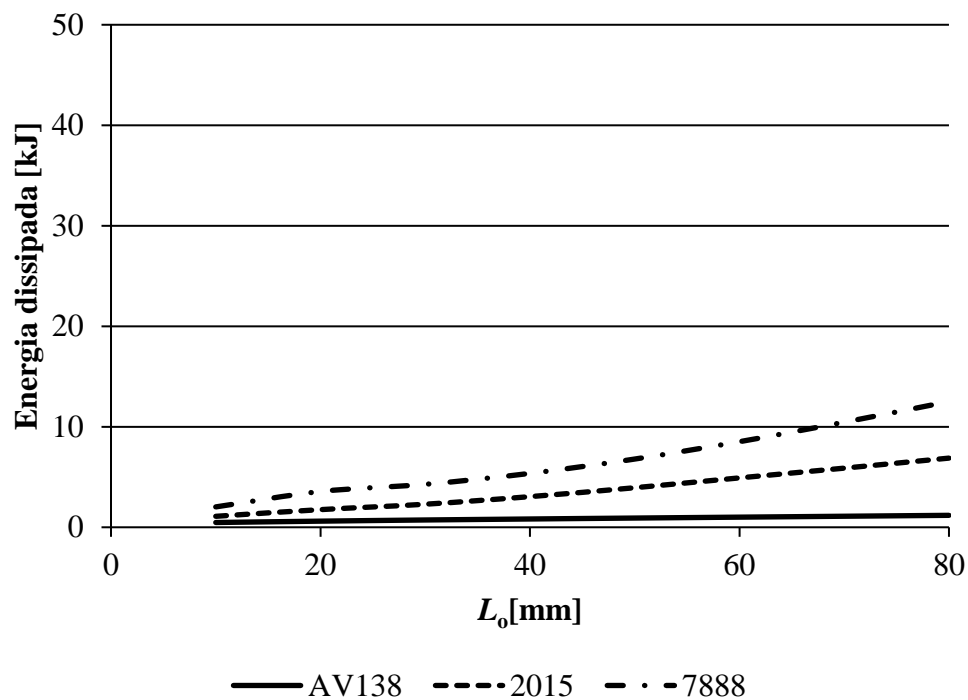


Figura 104 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 2,4 mm

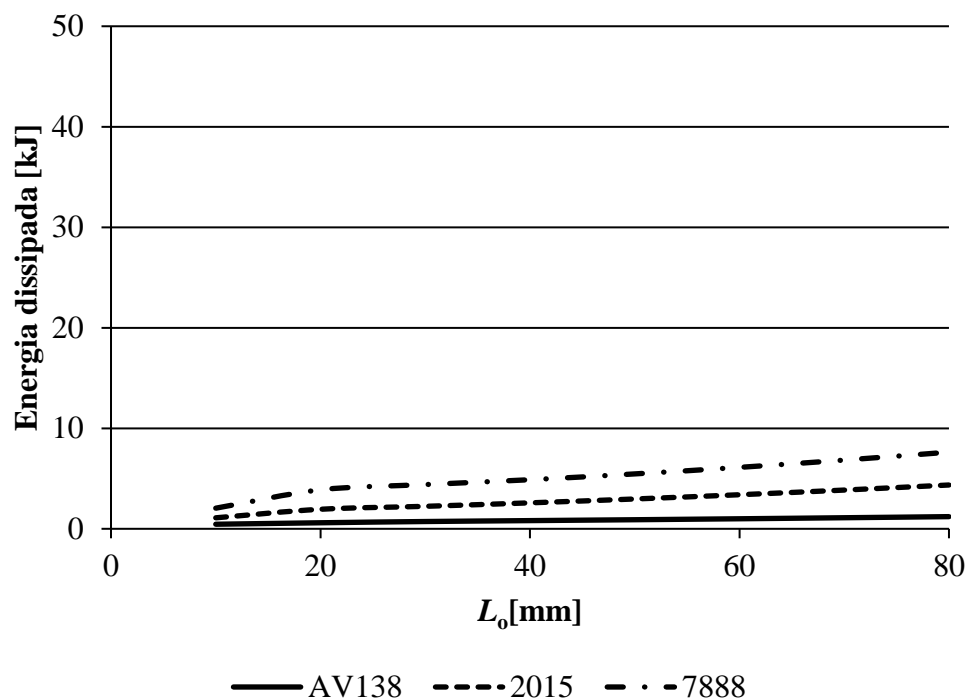


Figura 105 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, para um valor de t_p de 3,6 mm

Verifica-se, de uma forma consistente, que existe uma variação de todo desprezável da energia libertada para todos as juntas simuladas com o adesivo AV138, independentemente do valor de L_o ou de t_p . Isto ocorre por causa da sua altíssima rigidez, pois este adesivo, possuindo uma baixíssima capacidade de deformação plástica, entra sempre em rotura muito antes do que os outros dois adesivos dúcteis. Assim sendo, a energia libertada na altura do impacto é muito baixa, na ordem dos 1000 J, basicamente a mesma para todos as juntas deste adesivo.

A influência do parâmetro L_o é também muito clara, onde se verifica um aumento de energia dissipada na rotura à medida que L_o toma valores maiores. No entanto, este efeito é apenas significativo para um t_p de 1,2 mm. À medida que este aumenta, o ganho em termos de energia dissipada vai sendo cada vez menor. O que é também consistente nos 3 gráficos em termos da influência de L_o , é que a curva de energia tem uma forma aproximadamente logarítmica. Mesmo para um t_p , verifica-se que a curva do 2015 aparenta estar a aproximar-se de uma assíntota. Desta forma, pode-se concluir que, a partir de dado valor de L_o , o ganho de energia é desprezável, o que vai de encontro aos resultados observados no estudo da resistência. Este valor limite de L_o é diferente entre os adesivos e os valores de t_p que estão a ser analisados, mas verifica-se que a curva que apresenta um maior potencial em termos de libertação de energia é a do adesivo Sikaforce® 7888 a t_p de 1,2 mm.

Em conformidade com os resultados observados na análise da resistência, também a energia dissipada pelos adesivos na rotura diminui muito drasticamente

com o aumento de t_p . Por exemplo, uma junta curvada com o adesivo 2015 e L_0 de 80 mm liberta na sua rotura aproximadamente 25 kJ de energia para um t_p de 1,2 mm, enquanto a mesma junta para um t_p de 3,6 mm liberta cerca de 5 kJ de energia. Isto representa uma diminuição da energia libertada em cerca de 80%, o que indica a enorme influência que este parâmetro tem no comportamento das juntas curvadas. Uma vez mais, este efeito está relacionado com a curvatura dos aderentes, no sentido em que uma diminuição da capacidade de deformação do adesivo, implica que este tenha menores valores de energia associadas à sua deformação o que, quando somado, se traduz numa menor dissipação da energia na altura da rotura.

Também em conformidade com os resultados observados no estudo da resistência está a relação entre o 7888 e o 2015. Ao comparar estes dois adesivos, verifica-se que é o 7888 que liberta um pouco mais de energia no seu colapso. Este facto encontra-se uma vez mais ligado à maior capacidade de deformação plástica do 7888, o que permite que este adesivo suporte maiores energias associadas à sua deformação plástica. Na altura da rotura, a energia observada para juntas curvadas com este adesivo é um pouco superior comparativamente ao 2015. De notar que esta diferença é cada vez menor à medida que as juntas tomam maiores valores de t_p , o que reforça ainda mais a influência que este parâmetro em particular tem no desempenho das juntas curvadas.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Após a validação do método numérico a ser aplicado para a previsão do comportamento de juntas curvadas, procedeu-se à realização dos respetivos estudos no *software* Abaqus®. Os resultados fornecidos pelo programa apresentaram-se na forma de curvas $P-\delta$, que traduzem a resistência das juntas, curvas de dano, onde se verifica a degradação da camada de adesivo ao longo do L_0 assumido e curvas representativas da distribuição das tensões de corte e de arrancamento.

Relativamente à distribuição das tensões de arrancamento e de corte, observou-se que estas não são simétricas, isto é, ao contrário do que observa em JSS, os picos de tensão nas extremidades do adesivo são de magnitudes diferentes. A extremidade direita da zona de sobreposição foi sempre o local onde se registaram as maiores tensões, independentemente dos valores dos parâmetros de controlo. Esta distribuição diferenciada é consequência da existência de curvatura, onde o próprio modo de carregamento, que consiste num encastramento na extremidade livre da esquerda e um carregamento de tração na extremidade livre da direita, juntamente com o efeito dos aderentes curvados, pode ser uma explicação pela qual as tensões apresentam esta distribuição. Em termos da influência das variáveis de controlo, verificou-se que o parâmetro t_p tem a maior influência no comportamento da junta adesiva. Um aumento deste causou em todos os casos diminuições bastante acentuadas das tensões de corte e de arrancamento, pois o efeito da deformação dos aderentes, provocada pela sua curvatura, é mais preponderante para maiores valores de t_p , o que por sua vez causa para uma diminuição da capacidade dos adesivos em deformarem-se transversalmente e axialmente, o que acaba por provocar uma diminuição das tensões. Em todos os casos, um aumento de L_0 causou um aumento das tensões internas do adesivo no pico de tensão da extremidade direita do L_0 , a partir de um valor de aproximadamente 0,9 para x/L_0 , sendo que para a restante camada de adesivo, a influência de L_0 se revelou ser praticamente desprezável. Finalmente, o adesivo AV138, sendo mais rígido que o 2015 e que o 7888, vai ter um maior gradiente de tensões, o que explica o facto de terem sido registadas as maiores tensões nas juntas com este adesivo.

Relativamente ao dano na camada de adesivo, tal como era esperado, a rotura foi sempre pela extremidade direita da camada de adesivo, pois é esta que submetida às maiores tensões. O que é de notar é o dano observado nas juntas com o AV138. Uma vez que este adesivo é muito mais rígido que os outros dois em estudo, este atinge a rotura logo após ser atingido o seu limite elástico, pois a sua inabilidade de

distribuir tensões causa que estas fiquem sempre localizadas nas zonas das extremidades do adesivo, o que explica o facto de o dano máximo ser atingido nas extremidades, enquanto na zona central o dano é nulo. Esta situação não se verifica nos adesivos 2015 e 7888, que apresentam melhor capacidade de distribuição de tensões e, como tal, têm o dano mais repartido pela camada inteira.

Os resultados observados para a previsão da resistência e previsão da energia foram muito semelhantes, no sentido em que o 7888 conseguiu de forma consistente apresentar os melhores resultados em termos de desempenho. O AV138 entra logo em rotura após ser atingido o seu limite elástico, o que explica o facto de este aguentar a menor carga. Como a deformação na camada é extremamente baixa, devido à sua falta de capacidade de redistribuição de tensões, é normal que este apresente a menor energia dissipada. O 7888, sendo mais dúctil que o 2015, apresenta sempre uma maior capacidade de deformação plástica, o que explica o facto de este apresentar a maior resistência (maior $P_{\text{máx}}$) e maior energia dissipada. Também foi clara a influência de t_p , onde um aumento deste valor causou uma diminuição acentuada da energia dissipada e resistência da junta, muito devido ao efeito negativo que a curvatura dos aderentes causa na capacidade de deformação dos adesivos dúcteis 2015 e 7888. A influência de L_o é menor, no sentido que a curva que representa o comportamento das juntas em função de L_o é aproximadamente logarítmica, o que indica que a partir de um dado valor de L_o não ganha qualquer incremento de resistência.

O estudo das juntas curvadas é ainda muito recente e, como tal, o conhecimento que existe em relação ao comportamento destas é ainda muito superficial. Propõe-se, assim, alguns trabalhos futuros a serem realizados no âmbito destas:

- Simulação numérica de juntas curvadas com ressalto;
- Simulação numérica de juntas curvadas duplas (situação semelhante às JSD convencionais, em que os substratos se encontram curvados);
- Ensaio experimentais para a caracterização de juntas curvadas;
- Simulação numérica de juntas curvadas, mudando o material do substrato para material compósito cuja matriz seja reforçada por fibra de vidro ou para alumínio;
- Utilização de outros métodos numéricos para a simulação de juntas curvadas, como por exemplo o MDC trapezoidal.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Olson, D.L., *ASM handbook: welding, brazing, and soldering*. Vol. 6. 1993: Asm Intl.
2. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007.
3. DE MELLO, F., *Soldagem: processos e metalurgia*. 2004, São Paulo: Edgard Blücher.
4. Robert, W. and J. Messler, *Principles of welding*. 1999, New York: John Wiley & Sons, Inc.
5. Felizardo, I., *Apostila Tecnologia da Soldagem*. 2016, Apontamentos da unidade curricular de Tecnologia da Soldagem. Licenciatura em Engenharia Mecânica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
6. Brockmann, W., et al., *Adhesive bonding: Adhesives, applications and processes*. 2008: John Wiley & Sons.
7. Koller, J., U. Baumer, and D. Mania, *High-tech in the Middle Palaeolithic: Neandertal-manufactured pitch identified*. *European Journal of Archaeology*, 2001. 4(3): p. 385-397.
8. Ebnesajjad, S., *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*. 2010: William Andrew.
9. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
10. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria.
11. Pinto, A., *Apontamentos da unidade curricular de Processos de Ligação. Mestrado em Engenharia Mecânica*. 2017, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
12. Alves, J. *Aviões Militares: DeHaviland DH-98 Mosquito*. 2015 [Maio 2018]; Available from: <http://asasdeferro.blogspot.com/2018/07/dehaviland-dh-98-mosquito.html>.
13. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier.
14. Brandão, A., et al., *Adesivos em automóveis: Que adesivos se utilizam em automóveis e qual sua função*. Universidade do Porto–Faculdade de Engenharia (FEUP), Porto, 2010.
15. COGNARD, P., *Building & Construction Adhesives-Part I. General Information and Rules*. Adhesives & Sealants, 2003.
16. MURAD, D., *Global adhesives and sealants state of the union*. The ChemQuest Group, april, 2007.
17. Silva, C.P.d., *Comportamento de ligações adesivas entre compósitos de FRP e elementos estruturais de aço*. 2015.

18. SpecialChem. *Building & Construction to Lead in Polyurethane Sealant Market* 2017; Available from: <https://adhesives.specialchem.com/news/industry-news/marketsandmarkets-polyurethane-sealants-market-000187627>.
19. MAYS, G. and A. HUTCHINSON, *ADHESIVES IN CIVIL ENGINEERING*. 1992.
20. Weitzenböck, J.R., *Adhesives in marine engineering*. 2012: Elsevier.
21. Scott, N., *Linha de Adesivos Estruturais Crystic Crestomer® e Guia de Aplicação*. 2016.
22. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Vol. 1. 2005: Elsevier.
23. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000: McGraw-Hill.
24. Teixeira, L.M.B.S., *Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais*. 2000.
25. Da Silva, L.F. and R. Adams, *Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 227-235.
26. Da Silva, L.F. and R. Adams, *Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 216-226.
27. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2005.
28. Radice, J. and J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites science and technology, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
29. Taib, A.A., et al., *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International journal of adhesion and adhesives, 2006. **26**(4): p. 237-248.
30. Taib, A.A., et al., *Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006. **26**(4): p. 226-236.
31. Adams, R.D., et al., *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
32. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
33. Adams, R. and J. Comyn, *Joining using adhesives*. Assembly Automation, 2000. **20**(2): p. 109-117.
34. Mahdi, S., et al., *A comparison of oven-cured and induction-cured adhesively bonded composite joints*. Journal of composite materials, 2003. **37**(6): p. 519-542.
35. Ferreira, L.R.F., *ESTUDO PARAMÉTRICO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO*. 2017.
36. TECNOLÓGICA, C.F.D.E. and C.S. DA FONSECA, *EFEITO DO ADESIVO E DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO EM JUNTAS COLADAS*. 2015.

37. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International journal of adhesion and adhesives, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
38. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014.
39. Landrock, A.H. and S. Ebnesajjad, *Adhesives technology handbook*. 2008: William Andrew.
40. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016.
41. Adams, R.D. and W.C. Wake, *The Nature and Magnitude of Stresses in Adhesive Joints*, in *Structural Adhesive Joints in Engineering*. 1984, Springer. p. 14-114.
42. Carbas, R.J.C., *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*. 2008.
43. Mota, A.I.M., *Juntas de sobreposição simples com camada adesiva compósita*. 2013, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
44. Pereira, A., et al., *Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints*. Journal of Materials Processing Technology, 2010. **210**(4): p. 610-617.
45. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of strain analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
46. Adams, R., *The mechanics of bonded joints*. Structural Adhesives in Engineering, 1986: p. 17-24.
47. Crocombe, A., Adams, and RD, *Influence of the spew fillet and other parameters on the stress distribution in the single lap joint*. The Journal of Adhesion, 1981. **13**(2): p. 141-155.
48. Dorn, L. and W. Liu, *The stress state and failure properties of adhesive-bonded plastic/metal joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1993. **13**(1): p. 21-31.
49. Tsai, M., J. Morton, and F. Matthews, *Experimental and numerical studies of a laminated composite single-lap adhesive joint*. Journal of Composite Materials, 1995. **29**(9): p. 1254-1275.
50. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive bonded tubular lap joints*. The Journal of Adhesion, 1977. **9**(1): p. 1-18.
51. Adams, R. and J. Harris, *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987. **7**(2): p. 69-80.
52. Lang, T.P. and P. Mallick, *Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints*. International Journal of Adhesion and adhesives, 1998. **18**(3): p. 167-177.
53. Belingardi, G., L. Goglio, and A. Tarditi, *Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(4): p. 273-282.
54. Cherry, B. and N. Harrison, *Note: The Optimum Profile for a Lap Joint*. The Journal of Adhesion, 1970. **2**(2): p. 125-128.
55. Groth, H. and P. Nordlund, *Shape optimization of bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1991. **11**(4): p. 204-212.

56. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973: National Aeronautics and Space Administration.
57. Kishore, A.N. and N.S. Prasad, *An experimental study of Flat-Joggle-Flat bonded joints in composite laminates*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **35**: p. 55-58.
58. Campilho, R., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
59. Yan, Z.-M., et al., *A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint*. International journal of adhesion and adhesives, 2007. **27**(8): p. 687-695.
60. Liu, Y., S. Lemanski, and X. Zhang, *Parametric study of size, curvature and free edge effects on the predicted strength of bonded composite joints*. Composite Structures, 2018.
61. Ascione, F. and G. Mancusi, *Curve adhesive joints*. Composite Structures, 2012. **94**(8): p. 2657-2664.
62. Parida, S. and A. Pradhan, *Influence of curvature geometry of laminated FRP composite panels on delamination damage in adhesively bonded lap shear joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **54**: p. 57-66.
63. Tay, T., et al., *Mesh design in finite element analysis of post-buckled delamination in composite laminates*. Composite Structures, 1999. **47**(1-4): p. 603-611.
64. Raju, I., J. Crews Jr, and M. Aminpour, *Convergence of strain energy release rate components for edge-delaminated composite laminates*. Engineering fracture mechanics, 1988. **30**(3): p. 383-396.
65. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
66. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
67. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
68. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
69. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
70. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
71. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
72. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.

73. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
74. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
75. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
76. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
77. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
78. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
79. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
80. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
81. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
82. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
83. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
84. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
85. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
86. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
87. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
88. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
89. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.

90. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
91. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
92. de Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
93. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
94. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
95. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10–11): p. 2224-2230.
96. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
97. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1–4): p. 547-555.
98. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
99. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
100. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
101. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
102. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
103. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
104. Hua, Y., et al., *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
105. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.

106. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
107. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
108. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
109. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
110. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
111. Neto, J.A.B.P., *Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito*. 2011: Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
112. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009.
113. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
114. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, and J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
115. Campilho, R.D., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International journal of adhesion and adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
116. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
117. Nascimento, A.N.S., *Efeito da Espessura do Adesivo na Resistência de Juntas de Sobreposição Simples, na Ligação Materiais Compósitos*. 2013.
118. Loureiro, A.L.C.D., *Determination of the strain distribution in the adhesive joints using fiber bragg grating (FBG)*. 2011.
119. Pocius, A.V., *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. 2012: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
120. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
121. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
122. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
123. Campilho, R.D., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.

124. De Moura, M., et al., *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
125. Marques, E. and L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
126. Campilho, R.D.S.G., et al., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single-and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 678-686.
127. Campilho, R., et al., *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. Composites Part B: Engineering, 2013. **50**: p. 120-126.